

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Aplikace v oblasti vodíkových technologií

Applications in the field of hydrogen technologies

Zadání bakalářské práce

Student:

Filip Novák

Studijní program:

B0713A060005 Elektroenergetika

Téma:

Aplikace v oblasti vodíkových technologií
Applications in the field of hydrogen technologies

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor vodíkových technologií (H2T) z pohledu výroby a skladování vodíku
2. Analýza současné situace využití H2T v oblasti stacionárních aplikací pro energetické účely
3. Analýza současné situace využití H2T v oblasti mobilních aplikací pro dopravní účely
4. Perspektivy vývoje vodíkové infrastruktury a využití H2T v podmínkách ČR

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Tuček, V., Dvořáková, L., Hanzal, J.: Vodík, Česká asociace technických plynů, Praha, 2004.
2. Doucek, A., Tenkrát, D., Dlouhý, P.: Vodíkové hospodářství a možnosti využití vodíku k regulaci obnovitelných zdrojů energie, časopis Paliva, 2010.
3. Bilíček, P.: Problematika větrných a fotovoltaických zdrojů v distribučních sítích, Diplomová práce, Ostrava, 2011.
4. Srinivasan, S.: Fuel cells : from fundamentals to applications, New York, 2006
5. <<https://www.hytep.cz/cs/clanky/kategorie-clanku/clanky/627-stav-a-perspektivy-vodikovych-technologii>>
6. Vodíkové technologie <<http://www.hytep.cz/>>
7. ESA <<http://www.electricitystorage.org/site/technologies/>>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Moldřík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

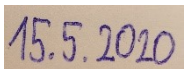
Datum odevzdání: 30.04.2020

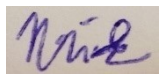

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandšetter, CSc.
děkan fakulty

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne


.....

Filip Novák

Poděkování

Děkuji panu Ing. Petru Moldříkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, které mi pomohly při vypracování bakalářské práce. Poděkování patří také. Na závěr děkuji všem, kteří mi pomohli a podporovali mě při realizaci bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou aplikací vodíkových technologií. Teoretická část je rozdělena na čtyři hlavní kapitoly. První část obsahuje různé postupy výroby a skladování vodíku. Druhá část práce se zabývá analýzou současného využití vodíkových technologií v oblasti stacionárních aplikací pro energetické účely, přičemž je zde vysvětlena současná vize snížení uhlíkových emisí. Třetí kapitola teoretické části je zaměřena na analýzu mobilních aplikací pro dopravní účely využitím vodíkové technologie. Ve čtvrté části této práce se zabývá problematikou vodíkových technologií v České republice.

Klíčová slova

Vodík, Infrastruktura, Dekarbonizace, Elektrolýza, Palivové články

Abstract

This bachelor thesis deals with the analysis of applications of hydrogen technologies. The theoretical part is divided into four main chapters. The first part contains various processes of hydrogen production and storage. The second part deals with the analysis of the current use of hydrogen technologies in the field of stationary applications for energy purposes, while explaining the current vision of reducing carbon emissions. The third chapter of the theoretical part is focused on the analysis of mobile applications for transport purposes using hydrogen technology. The fourth part of this work deals with the issue of hydrogen technologies in the Czech Republic.

Key Words

Hydrogen, Infrastructure, Decarbonization, Electrolysis, Fuel Cells

Obsah

Obsah.....	5
Seznam použitých zkratek.....	7
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Úvod.....	11
1. Výroba vodíku.....	12
1.1. Elektrolýza	13
1.1.1. Foto-elektrolýza	14
1.1.2. Termochemické dělení vody	15
1.2. Vodík z fosilních paliv	15
1.2.1. Steam reforming (SR)	15
1.2.2. Parciální oxidace (POX).....	16
1.2.3. Autothermal reforming (ATR)	17
2. Skladování vodíku.....	18
2.1. Konvenční metody	18
2.1.1. Stlačený vodík	18
2.1.2. Kapalný vodík	18
2.2. Alternativní metody.....	19
2.2.1. Hybrid	19
2.2.2. Metalhybridy	19
2.2.3. Uhlíkové struktury.....	19
2.2.4. Skleněné mikrokuličky.....	19
3. Využití H ₂ T v oblasti stacionárních aplikací	20
3.1. Metanizace	20
3.2. Syntéza amoniaku	22
3.3. H ₂ T jako chemická baterie	23
3.4. Vytápění	24
3.4.1. Hybridní systém: Vodík x Telené čerpadlo.....	24
3.5. P2G a HIGG projekty po celém světě.....	25
3.5.1. Power-To-Gas (P2G).....	25
3.5.2. Vmíchání vodíku do dodávky zemního plynu (HIGG).....	27
4. Využití H ₂ T v oblastní autodopravy	29
4.1.1. Bezpečnost	30
4.1.2. Infrastruktura.....	31

4.1.2.1.	Přeprava stlačeného vodíku.....	31
4.1.2.2.	Přeprava kapalného vodíku	31
4.1.2.3.	Potrubí na vodík:	31
4.1.2.4.	Místní (vlastní) výroba:	31
4.1.3.	Cena.....	32
4.2.	Hnací ústrojí vodíkových motorů.....	32
4.3.	Plnicí stanice	33
4.4.	Osobní automobily	33
4.5.	Ostatní silniční transport	34
4.5.1.	Fuel Cell Autobusy (FCA)	34
4.5.2.	Nákladní vozidla	34
4.6.	Nesilniční transport	35
4.6.1.	Vlaky	35
5.	Technologie H2T v podmínkách ČR.....	36
5.1.	Česká vodíková technologická platforma (HYTEP).....	36
5.2.	Očekávaný vývoj podle NAP CM.....	36
5.2.1.	Cíl.....	36
5.3.	Plnicí stanice	37
5.4.	Dopravní prostředky.....	38
5.4.1.	Osobní automobily	38
5.4.2.	TriHyBus.....	38
Závěr		39
Literatura		40

Seznam použitých zkratek

2NH ₃	amoniak
ATR	Autothermal reforming
bar	jednotka tlaku
BEV	Bateriemi poháněný elektro automobil
BWR	varný reaktor
CCC	Committee on Climate Change
CCS	technologie na zachycení a uskladnění uhlíku
CH ₄	Methan
CH ₃ OH	methanol
CNG	Stlačený zemní plyn
CO	Oxid uhelnatý
CO ₂	Oxid uhličitý
COS	karnobylsulfid
CRI	Carbon Recycling International
DPO a.s.	Dopravní podnik ostrava a.s.
e ⁻	elektron
FC	palivový článek
FCA	autobusy poháněné palivovými články
FCEV	Elektrické vozidlo poháněné palivovými články
H ₂	Vodík
H ₂ O	voda
H ₂ S	sulfan
HIGG	Vmíchání vodíku do dodávky zemního plynu
HYTEP	Česká vodíková technologická platforma
kJ/mol	Standardní slučovací entalpie
LNG	Zkapalněný zemní plyn
MCFC	typ palivového článku
NAP CM	Národní akční plán čisté mobility
NaCl	chlorid sodný
NaOH	Hydroxid sodný
Ni	nikl
NO _x	oxidy dusíku
O ₂	Kyslík
O ₂ ⁻	anionty kyslíku
OH	ionty hydroxidu
P2G	Power-to-Gas
PAFC	typ palivového článku
PEC	foto-elektrolyzer
PEM	typ elektrolyzéru
PEMFC	typ palivového článku
POX	parciální oxidace
Rh	rhodium

SOE	Typ elektrolyzéru
SOFC	typ palivového článku
SR	steam reforming
SUV	sportovně užitkové vozidlo
syngas	syntetický plyn
ÚJV Řez a.s.	Ústav jaderného výzkumu a.s.
VKMS	vozidlo s konvenčním spalovacím motorem
ZrO ₂	oxid zirkoničitý

Seznam obrázků

Obrázek 1 Distribuce primárních zdrojů energie pro výrobu vodíku. (3).....	12
Obrázek 2 Elektrolýzér (PEM) (4).....	13
Obrázek 3 Digram představuje energetickou konfiguraci a reakci pro PEC. Zdroj přímého osvětlení je znázorněn žlutou šipkou. P-type a N-type znázorňují elektrické pole, které je spontánně generováno, když je polovodič ponořen do roztoku. Generované elektrické pole pro díry (◦) a elektrony (•) je v opačném směru. Po iluminaci toto elektrické pole poskytne napětí mezi přední částí (osvětlená) a zadní částí (tmavá bez světla) polovodiče, který řídí vodní dělení. [102].....	14
Obrázek 4 Schéma steam reformingu [1].....	16
Obrázek 5 Schéma parciální oxidace těžkých ropných olejů (1 generátor, 2 kotel na výrobu páry, 3 chladič, 4 separátor, 5 pračka) [9].....	16
Obrázek 6 Řez nádobou pro skladování stlačeného vodíku. [6]	18
Obrázek 7 Kryogenní nádoba. [6]	18
Obrázek 8 Struktury nanotrubic. [6]	19
Obrázek 9 Soubor mikroskopických kuliček [6].....	19
Obrázek 10 Průmyslový závod George Olah na výrobu methanu [12].....	20
Obrázek 11 Konvekční smyčka výroby methanu ze syntetického plynu [12]	21
Obrázek 12 Smyčka výroby methanolu podle společnosti CRI [12]	21
Obrázek 13 Proces výroby amoniaku [18].....	22
Obrázek 14 Predikce světové výroby el. energie z různých zdrojů [24].....	23
Obrázek 15 Porovnání účinnosti mezi tepelnou pumpou a vodíkovými boilerly v případě využití čisté energi, i když v praxi se účinnosti můžou lyšit, tak můžeme vidět, že tepelné pumpy jsou účinnější než vodíkové boilerly. [25]	25
Obrázek 16 Časová osa P2G projektů uvedených do provozu, k roku 2018. [29].....	26
Obrázek 17 Jmenovité výkony elektrolyzů. [29].....	26
Obrázek 18 Množství rozšíření P2G projektů po celém světě. [29].....	27
Obrázek 19 Obrázek vlevo ukazuje limity vmíchávání vodíků do plyné sítě. Obrázek vpravo ukazuje vztah mezi obsahem vodíku a úspory CO ₂ . [28].....	28
Obrázek 20 Graf počtu vyrobených konvečních spalovacích autmobilů, za rok 2019. [39]	29
Obrázek 21 . Porovnání bezpečnosti v případě požáru H ₂ vozidla (vlevo) a vozidla na plyn (vpravo). [40].....	30
Obrázek 22 Mapa vodíkových plnicích stanic. [72].....	33
Obrázek 23 Predikce překrytí cen automobilů na různé pohony. [56].....	33
Obrázek 24 První plnicí stanice v Neratovicích. [87]	37
Obrázek 25 Plánované plnicí stanice na hlavních dopravních tazích ČR. [93].....	38

Seznam tabulek

Tabulka 1 Porovnání různých druhů palivových článků v různých oblastech použití. [28].....	25
Tabulka 2 Výpis některých HIGG projektů, buď v provozu, nebo plánu. [36]	28
Tabulka 3 Přehled transportu a distribuce vodíku různými technologiemi. [28,41]	31
Tabulka 4 Porovnání technologie FCEV s konvenčním spalovacím motorem na fosilní paliva (VKSM) a elektrické automobily poháněné bateriemi (BEV). [28].....	32

Úvod

Je nejrozšířenějším prvkem na celém světě. Je 14,38x lehčí a vede teplo sedmkrát lépe než vzduch. Vodík se při normální teplotě považuje za stabilní. Při zvýšené teplotě se stává reaktivnější, především s kyslíkem. [1]

Vodík tvoří velkou většinu všech věcí ve vesmíru, ale najít ho v jeho čisté formě je velmi vzácné. Což znamená, že k produkci vodíku potřebujeme extrahovat sloučeniny, v nich se vyskytuje vodík. Proces extrahování potřebuje nějakou energii, ale vodík může být vyroben nebo extrahován z jakýchkoliv primárních zdrojů energie (fosilních či obnovitelných zdrojů). Vodík může být vyroben z různých zdrojů; z fosilních paliv (biomasa, zemní plyn, uhlí, jádro atd...) a obnovitelných zdrojů (solární, větrné, geotermální zdroje atd...). A díky tomu, že je zde taková různorodost potenciálních zdrojů, se vodík zdá jako slibný nosič energie. [1,6,7]

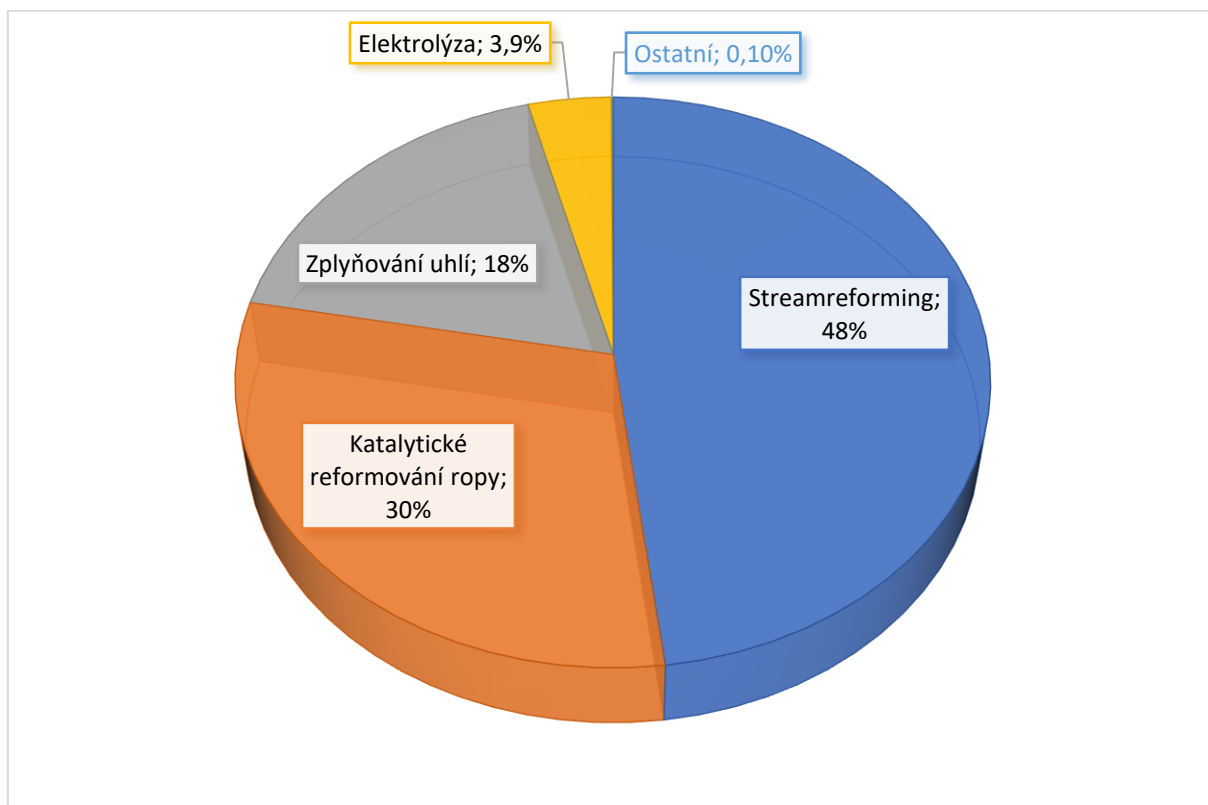
Co nám umožňuje fakt, že vodík je dobrý nosič energie. Například; když větrné elektrárny pracují v době, kdy nepotřebujeme elektrickou energii, tak tuhle přebytečnou energii můžeme uložit ve vodíku a udělat ji dostupnou později.

V první části práce se budeme zabývat problematikou výroby a skladování, kde si popíšeme několik druhů výroby. V druhé části bakalářské práce se podíváme na využití vodíku v průmyslu a jak nám může pomoci s dekarbonizací. Ve třetí části probereme bezpečnost, infrastrukturu a cenu automobilního průmyslu a možnosti využití palivových článků. A poslední kapitola se zabývá Českou republikou a možným rozvojem vodíkových technologií.

1. Výroba vodíku

Spotřeba vodíku se odhaduje na 70 miliónů tun za rok 2019. Nejčastější využití je v ropných rafineriích a chemických výroбах. [2,7]

Z analýzy provedené v roce 2005 se můžeme dozvědět, že dnes se vodík vyrábí většinou z fosilních paliv nejčastěji za pomoci steam reformingu, katalytického reformování ropy či zplyňování. Největší problém u těchto metod je produkce CO₂. Produkce vodíku je zodpovědná za uvolnění více než 830 miliónů tun CO₂ ročně. To je přibližně stejné množství vypuštěného CO₂ jako Velké Británie a Indonésie dohromady. Jsou zde procesy které, při výrobě mohou být i bez emisí CO₂ tzv. „zelený vodík“, tato metoda se nazývá elektrolýza. [1,3,6]



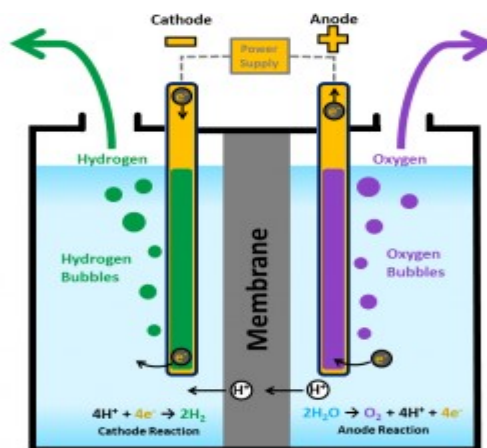
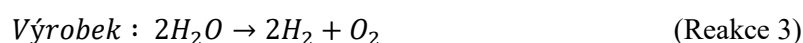
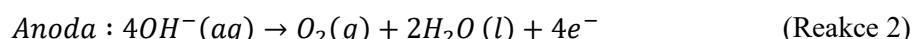
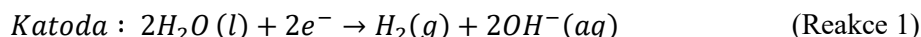
Obrázek 1 Distribuce primárních zdrojů energie pro výrobu vodíku. (3)

1.1. Elektrolýza

Elektrolýzu můžeme považovat za skoro čistou metodu výroby vodíku. Důvodem proč tato metoda není zatím 100% čistá je, že potřebuje elektrickou energii, a to v případě klasické elektrolýzy. Technologie výroby a přeměny není dostatečně prozkoumaná a tyto metody jsou teprve ve stavu experimentů; typy metod: Foto-elektrolýza a termochemické dělení vody tzv.: Termolýza.

V dnešní době elektrolýza přispívá asi 3,9 % vyrobeného vodíku celosvětově. Elektrolýza vody neboli rozdělování vodíku a kyslíku, je relativně dobře známá.

Proces, při němž stejnosměrný proud, procházející elektrodami ponořené ve vodní směsi, rozděluje chemické vazby ve vodních molekulách. Průchodem proudu se uvolní vodík a kyslík:

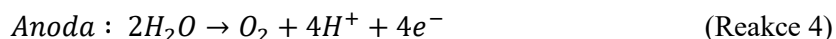


Obrázek 2 Elektrolýzer (PEM) (4)

Tento proces se provádí za pokojové teploty. Elektrody se vyrábějí z platiny (Pt), protože nereagují s elektrolytem, kterým je kyselina sírová. Ačkoliv je tato technologie velice náročná na elektrickou energii, může se stále považovat za čistou, jelikož lze využít obnovitelný zdroj energie. [1,4,6]

Efektivita elektrolýzy je okolo 50-70 %. V této době jsou na trhu tři druhy elektrolýzerů.

- Alkalický elektrolýzer – používá kapalný elektrolyt nejčastěji hydroxid draselný (KOH), taktéž můžeme použít hydroxid sodný (NaOH) nebo chlorid sodný (NaCl). Ionty hydroxidu (OH^-) jsou přenášeny přes elektrolyt od katody k anodě, vodík se začne generovat na straně katody. Provozní teplota 100 °C–150 °C. [1]
- PEM – neboli tuhý polymerový elektrolyt. Používá elektrolyt v pevném stavu, který není elektricky vodivý. Membrána má dvojí účel – odděluje plyny a taktéž slouží jako vodič iontů. Provozní teplota 70 °C–90 °C. [4]
 - Voda reaguje na anodě za vzniku kyslíku a nabitých kationtech vodíku.
 - Tok elektronů přes vnější obvod zapříčiní to, že se ionty vodíků začnou pohybovat přes PEM membránu ke katodě
 - Na katodě se ionty vodíku a elektrony z vnějšího obvodu zkombinují a začnou vytvářet plyný vodík. [4]



- SOE – neboli elektrolyzátor na bázi pevného oxidu. Jako elektrolyt se používá keramický materiál, který vede při zvýšených teplotách anionty kyslíku (O_2^-). Tenhle elektrolyzátor generuje vodík trochu odlišným způsobem než ostatní. [6]
 - Voda u katody se začne kombinovat s elektrony z vnějšího obvodu a začne vytvářet plynný vodík a anionty kyslíku.
 - Anionty kyslíku se dostanou přes keramickou membránu a reagují s anodou a začne se formovat plynný kyslík a začnou se generovat elektrony do vnějšího obvodu.

Provozní teplota 700 °C–800 °C. [1,6]

1.1.1. Foto-elektrolýza

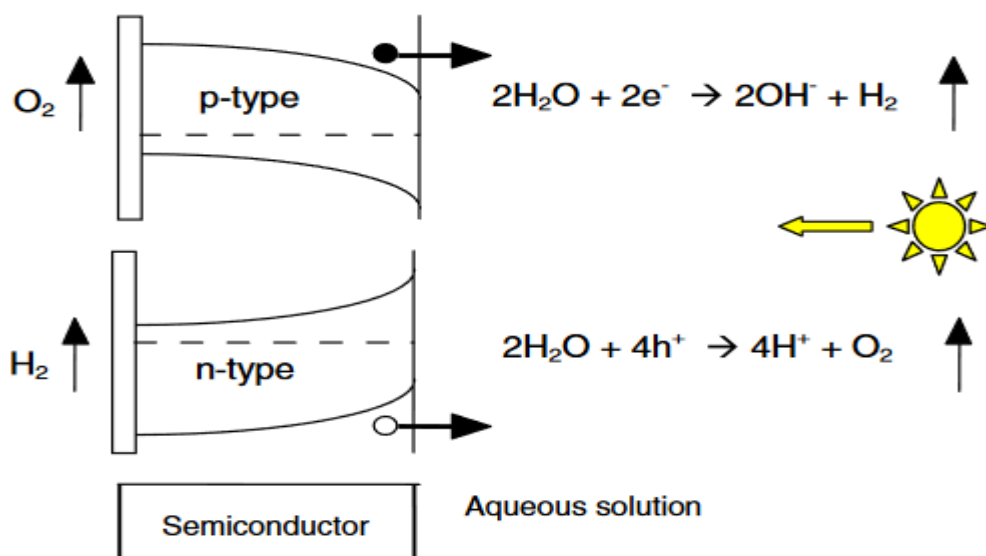
Experimentální technika pro získávání vodíku. Uvažuje se, že tahle možnost bude nejlevnější a nejefektivnější metodou výroby vodíku z obnovitelných zdrojů.

Termodynamický potenciál pro dělení vody na vodík a kyslík při 25 °C je 1,23V. Při připočítání ztrát a ztracené energie při řízení reakce při rozumné míře kalkulovaného napětí pro rozložení vody je 1,6-1,8 V. Komerční elektrolýza pracuje okolo 1,7-1,9 V. [102]

Pro přímou produkci vodíku metodou PEC (foto-elektrochemická reakce) potřebujeme jen sluneční záření. Přímě osvětlený polovodič, který je ponořen do roztoku, je použit pro přímé rozložení vody. Světlo je absorbované polovodičem a voda je rozložena na povrchu polovodiče. Aby tenhle proces byl rentabilní, musí splňovat dvě podmínky. [102]

- Systém sběru světla musí být dostatečně schopný generovat dostatečné napětí pro rozložení vody
- Systém musí být stabilní ve vodním prostředí

p-type and n-type.



Obrázek 3 Digram představuje energetickou konfiguraci a reakci pro PEC. Zdroj přímého osvětlení je znázorněn žlutou šipkou. P-type a N-type znázorňují elektrické pole, které je spontánně generováno, když je polovodič ponořen do roztoku. Generované elektrické pole pro díry (◦) a elektrony (•) je v opačném směru. Po iluminaci toto elektrické pole poskytne napětí mezi přední částí (osvětlená) a zadní částí (tmavá bez světla) polovodiče, který řídí vodní dělení. [102]

1.1.2. Termochemické dělení vody

Během let 1970 a 1980 nastaly dvě ropné krize, a tak vědci museli přijít s novým zdroje a produkcí alternativního paliva. V termochemickém dělení vody, taktéž termolýza, je samostatné teplo používané pro rozklad vody na vodík a kyslík. Předpokládaná efektivita je okolo 50 %.

Jedno-stupňová disociace vody je popsána následovně:



Nevýhoda tohoto procesu je neefektivita separace H_2 a O_2 . Membrána tohoto zařízení by měla být postavena na materiálech s velkou tepelnou rezistivitou např.: Oxid zirkoničitý (ZrO_2), Palladium (Pd) pro lepší separaci vodíku. [103]

1.2. Vodík z fosilních paliv

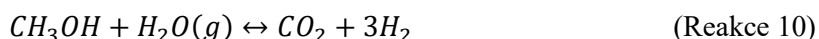
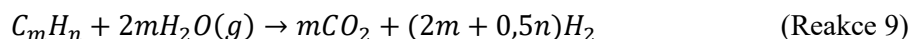
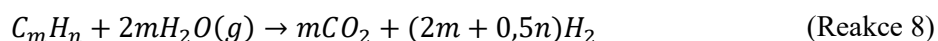
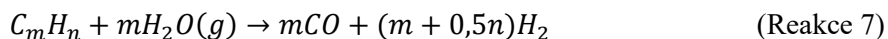
V dnešní době 96 % celosvětového vyrobeného vodíku je vyrobeno z fosilních paliv. Pro získání vodíku hledáme taková fosilní paliva, která obsahují vodík a můžeme jej přeměnit na plyn, který je bohatý na vodík, např: benzín, uhlovodíky, methanol, ethanol atd... Ale komerčně nejrozšířenější způsob získávání vodíku, je ze zpracování metanu (zemní plyn). U většiny paliv je problém s odsiřováním, proto při plánování hospodářství okolo vodíku se s tímhle musí počítat. [3,8]

Vodík může být vyroben s použitím tří základních technologií: Steam reformingu, parciální oxidace a autothermal reforming.

Největší nevýhodou je však emise CO_2 do ovzduší.

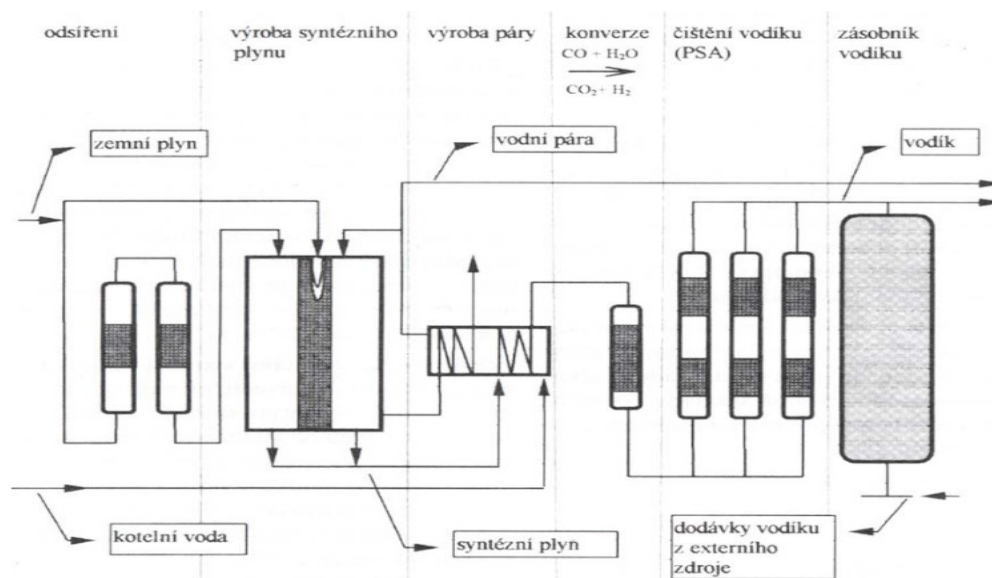
1.2.1. Steam reforming (SR)

Nejrozšířenější přitom nejlevnější metoda výroby vodíku. Největší výhody oproti ostatním jsou: vysoká účinnost 70-85 %, nízké provozní a výrobní náklady. Nejpoužívanější materiály, zemní plyn, lehčí uhlovodíky, methanol a další okysličené uhlovodíky. Reakce pro uhlovodíky a methanol (výchozí surovina) je:



V první části se snažíme vytvořit syngas neboli syntézní plyn (H_2/CO), tak že přivádíme do reaktoru uhlovodíkovou surovinu smíchnou s párou. Proto, aby se dosáhlo požadované teploty reakce je do reaktoru přiváděn vzduch.. V druhé části přivádíme produkt do CO katalyzátoru, kde se oxid uhelnatý rozkládá na vodík a kyslík. Celý proces vyžaduje surové palivo bez síry.

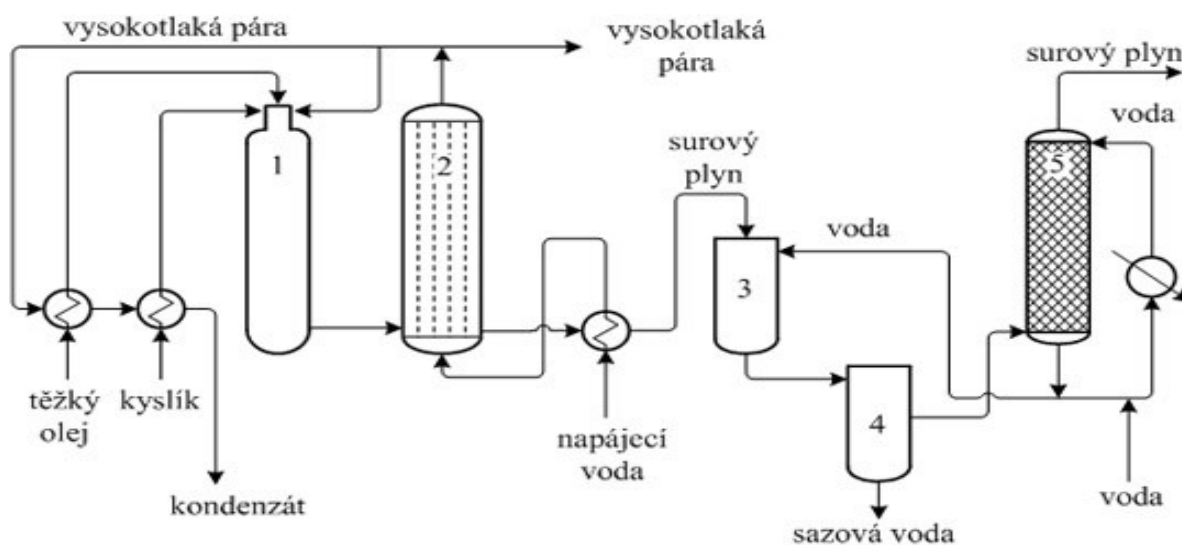
Teplota provozu se liší od použitého paliva; pro methanol a okysličené uhlovodíky je teplota okolo 180 °C; konvenční suroviny jako jsou uhlovodíky je teplota okolo 500 °C [1,3 8]



Obrázek 4 Schéma steam reformingu [1]

1.2.2. Parciální oxidace (POX)

Používané většinou v automobilové technice a dalších komerčních aplikacích. Pro zplyňování je použito surových materiálu jako methan, bioplyn, ale nejčastěji těžký ropné frakce. Zplyňování materiálu většinou dochází za přítomnosti kyslíku a vodní páry. Teplota provozu je 1300 °C–1500 °C za tlaku v rozmezí od 3-8 MPa. S porovnáním se steam reformingem ($H_2:CO = 3:1$), je tato metoda méně ekologičtější, protože se vyprodukuje více CO ($H_2:CO = 1:1$ nebo $2:1$):



Obrázek 5 Schéma parciální oxidace těžkých ropných olejů (1 generátor, 2 kotel na výrobu páry, 3 chladič, 4 separátor, 5 pračka) [9]

Při zplyňování vzniknou tyto látky: CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄, Sulfan (H₂S), karnobylsulfid (COS), část plynu je spáleno jako palivo a část poskytne teplo pro endotermickou reakci. Největší nevýhodou jsou saze, které vznikají po reakci. Množství sazí závisí na poměru $H : C$. I když provozní náklady jsou levnější než u steam reformingu, tak technologie přeměny je o dost větší. Tím že u toho procesu není důležitý katalyzátor, nemusíme z paliva odstraňovat sírové prvky zemního plynu. Při použití katalyzátoru se zmenší operační teplota na 700 °C–1000 °C, jenže nastává problém s kontrolou teploty z důvodu exotermické reakce; začne formování koksu a horkých místa. Pro zemní plyn se jako katalyzátor používá nikl (Ni) nebo rhodium (Rh). [3, 8]

1.2.3. Autothermal reforming (ATR)

Je to kombinace jak SR (endotermická reakce) tak POX (exotermická reakce). Výhodou je, že nepotřebuje dodávat do systému žádné teplo, a proto je levnější než SR methanu. [3]

2. Skladování vodíku

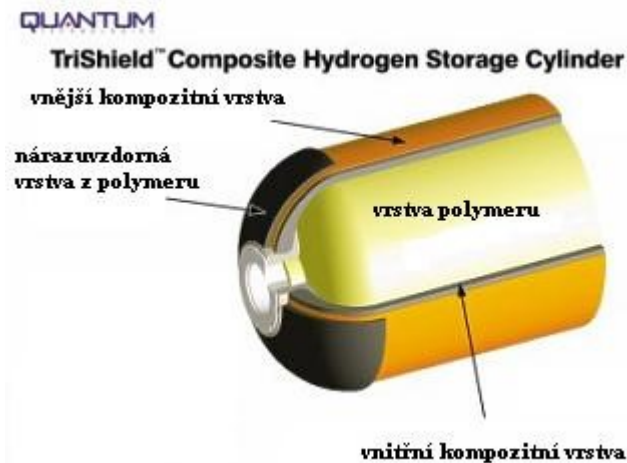
Skladování můžeme rozdělit do 2 hlavních skupin: 1. konvenční skladování – pod které spadá stlačený vodík, zkapalnění vodíku. 2. Alternativní metody – například Hybridy, uhlíkové struktury, skleněné mikrokuličky.

2.1. Konvenční metody

Pod které spadá: Stlačování vodíku, zkapalňování vodíku.

2.1.1. Stlačený vodík

S ohledem na skladování a doplňování, je tahle metoda pro krátkodobé období velmi slibná. Používají se tlakové láhve nejčastěji z legované chrommolybdenové oceli; vodní objem 50 l, tlakují se na 200 bar. Obsah pro naplnění cca 8,9 m³. Případě velké spotřeby si spotřebitel může postavit velkokapacitní tlakové zásobníky o menším tlaku - 50 bar a vodním objemu 25, 50 a 95 m³. [10]

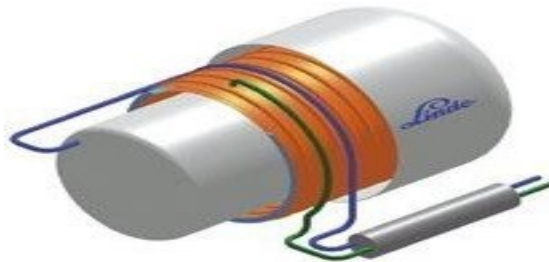


Obrázek 6 Řez nádobou pro skladování stlačeného vodíku. [6]

2.1.2. Kapalný vodík

Oproti stlačenému vodíku, kapalný vodík nabízí ještě menší hmotnost a objem na jednotku energie. Největší problém skladování kapalného vodíku je jeho teplota varu, může se stát, že se vodík doslova vypaří. Vodík musí být uskladněn při 20 K (-253,15 °C). Velké nároky se kladou na výrobu přepravních kontejnerů, které musí být dobře izolované, aby udržel teplotu a musí být vyztuženy pro skladování vodíku pod tlakem. [10]

„Zkapalňování vodíku je technologicky i energeticky náročný proces. Energie potřebná ke zkapalnění dosahuje přibližně 40 % energie v palivu.“ [1]



Obrázek 7 Kryogenní nádoba. [6]

2.2. Alternativní metody

2.2.1. Hybrid

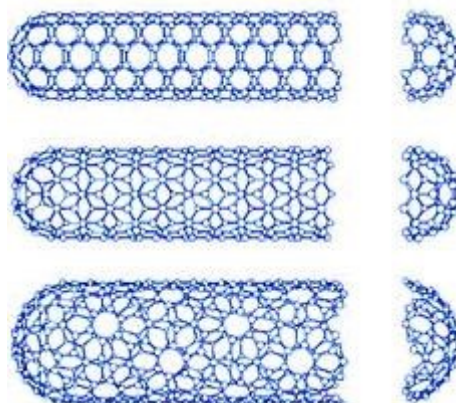
Systémy úschovy vodíku, jsou založeny na absorpci vodíku do materiálu na bázi kovu. Jde o exotermní reakci, tj. při vstřebání vodíku se vyvíjí teplo, opačný princip nastává, když chceme vodík dostat ven, nastává tedy desorpce. Desorpce potřebuje dodat teplo proto, aby systém mohl uvolnit vodík. [1]

2.2.2. Metalhybridy

Kovové hybridy jsou specifickou kombinací kovových slitin, které dokážou absorbovat a později uvolnit vodík. [10]

2.2.3. Uhlíkové struktury

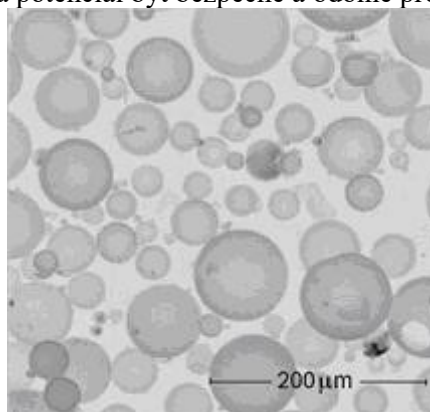
Různé varianty uhlíků například: grafit, fullereny, nanotrubic a aktivovaný uhlík s velkou plochou, můžeme využít jako uskladnění vodíku. Tato metoda je zatím experimentální. Snahou je vylepšovat technologii výroby a redukovat cenu nanotrubic a přibližovat se ke komerčnímu využití. [1,10]



Obrázek 8 Struktury nanotrubic. [6]

2.2.4. Skleněné mikrokuličky

Vodík se může uskladnit v dutých mikroskopických kuličkách, křemičitého sklad. Při vysoké teplotě (cca. 500 °C) stěny těchto kuliček začnou být propustnými pro vodík a při okolní teplotě je zeď neprodyšná pro vodík. Když potřebujeme dostat vodík z těchto mikroskopických kuliček ven, stačí jen to sklo zahřát. Křemičité sklo má potenciál být bezpečné a odolné proti kontaminaci. [1]



Obrázek 9 Soubor mikroskopických kuliček [6]

3. Využití H₂T v oblasti stacionárních aplikací

3.1. Metanizace

Přeměnou oxidu uhličitého na methanol, který by se dal využít nejen jako palivo, přídavek do paliva, komplexnější přeprava paliva, ale i pro chemický průmysl jako meziprodukt na výrobu; plastu, barev, textilu a dalších. Jedná se o efektivní alternativu zbavení se oxidu uhličitého. Na základě fyzikálních vlastností je methanol při pokojové teplotě kapalný, tím pádem má snadnější skladovací a přepravovací schopnosti než jiné alternativy, jako je methan nebo vodík. Takzvaný obnovitelný methanol, kde elektrická energie obnovitelných zdrojů je přeměněna na chemickou energii a uložena v chemických vazbách methanolu. Tenhle způsob poskytuje: exportování energii z izolovaných míst (například Island, který má hojnou paletu obnovitelných zdrojů) bez elektrického spojení se sousedními zeměmi. Navíc k masivně rostoucí celosvětové poptávce po methanolu více jak 419 000 tun denně [13]. Přesměrováním CO₂ z atmosféry do methanolu má nejen významný potenciál pro růst jako komodity chemické nebo palivové ale hlavní potenciál je recyklace velkého množství CO₂ z atmosféry. [12]

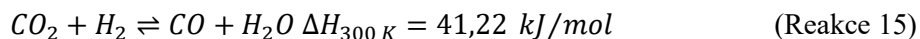
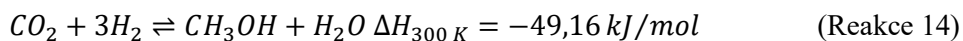
Methanol se obvykle vyrábí ve velkém měřítku ze syntetického plynu tzn.: syngas, což je kombinace různého množství H₂, CO a CO₂, často získávaný zplyňováním uhlí nebo ze zemního plynu. Proces výroby syntetického methanolu ze syntetického plynu, zahrnuje methanol samotný, ale i výrobu jiných látek jako jsou CO a CO₂, taktéž různé lehké a těžké co-produkty. Výskyt co-produktů je výsledkem více komplexních řad reakcí, které vznikají při reakci tří reaktivních plynů mezi sebou na povrchu katalyzátoru. Abychom dostali jen methanol musíme investovat další energii, tím pádem více peněz na purifikaci methanolu od těchto co-produktů. [12]

Společnost Carbon Recycling International (CRI), Islandská společnost založena roku 2006, která vyvinula technologii na produkování tzv.: obnovitelného methanolu z přímé přeměny CO₂ na CH₃OH za pomoci vodíku, který se vyrábí elektrolýzou napájenou z obnovitelných zdrojů. CRI operuje jeden z největších průmyslových závodů na výrobu methanolu z přímé přeměny od roku 2012 (Obrázek 10). [15] Průmyslový závod je pojmenovaný na počest laureáta Nobelovy ceny George Olaha. Výrobní kapacita závodu je 4 000 t methanolu ročně. Oxid uhličitý je extrahován z nedaleké geotermální elektrárny, mezitím co vodík je vyráběn z alkalického vodního elektrolyzéru, který je napájen z Islandské elektrické soustavy, která je tvořena primárně jen ze zdrojů obnovitelné energie. [11]

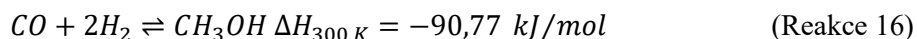


Obrázek 10 Průmyslový závod George Olah na výrobu methanu [12]

Syntéza methanolu začíná s čistým zdrojem a kontrolovanou koncentrací CO_2 a H_2 , která velmi zjednodušuje chemické reakce produktu. V podstatě se redukuje pouze na dvě reakce (Reakce 14)(Reakce 15):

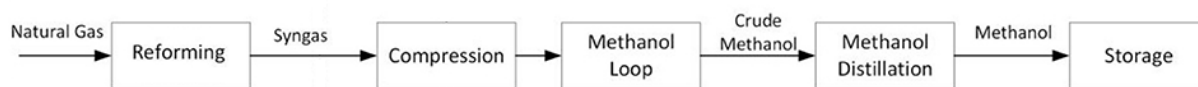


Výroba methanolu ze syngasu se v mnoha ohledech liší od výroby při využití čistého CO_2 a H_2 . Například tvorba methanolu, z CO je založena na přímé interakci H_2 pro výrobu CH_3OH (Reakce 16):

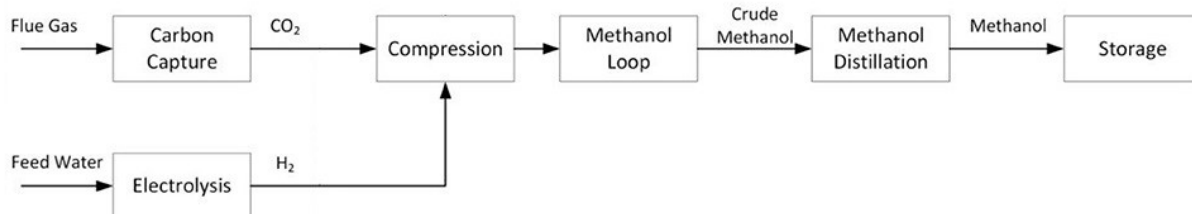


Přeměna je relativně velmi exotermická -90,77 kJ/mol (Reakce 15), tahle skutečnost představuje velký problém, při stavbě reaktoru, Reaktor se totiž musí zbavit přebytečného tepla, které ho může poškodit. Tím pádem se musí zainvestovat více finančních zdrojů do chlazení [12]. Většinou se používají varné reaktory (BWR), které jsou velmi drahé a složité zařízení, ale jsou důležité pro zmírnění generovaného tepla z exotermické reakce při produkci methanolu. [14]

Na druhé straně, když začínáme s čistým CO_2 podle (Reakce 14), exotermická reakce není tak velká a může se konat v modifikovaných plynem chlazených reaktorech tzn. tube-cooled reactor [16]. Využití toho typu reaktorů má i své výhody oproti dosavadním reaktorovým konfiguracím z hlediska nižší ceny, vyšší efektivity a relativně jednodušší operace schopnosti. [14]



Obrázek 11 Konvekční smyčka výroby methanu ze syntetického plynu [12]



Obrázek 12 Smyčka výroby methanolu podle společnosti CRI [12]

Konvenčně vyráběný surový methan má mnoho nečistot jak v plynném, tak v kapalném stavu, což nám ztěžuje práci z hlediska čištění. Druhy nečistot, které můžeme očekávat, a kterých se musíme zbavit jsou například různé alkoholy (nejčastěji ethanol), estery, ethery (Dimethylether), ketony (aceton, butanon). Abychom se zbavili těchto nečistot musíme provádět čištění složitým a velmi energeticky náročným způsobem přes různé destilační a frakční kolony. [12,14]

Jak už bylo popsáno, problémem je nadměrné uvolňování teploty. Ale tento problém můžeme zmírnit, pokud budeme při syntetizaci využívat (Reakce 14)(Reakce 15), což má za následek menší teplotu. Tím pádem nemusíme využívat BWR, které slouží k lepší kontrole teploty vně reaktoru. Můžeme použít tube-cooled reaktor, které si vystačí sám a nepotřebují žádné přídatné systémy na kontrolu teploty. Jen jeden tube-cooled reaktor si vystačí na výrobu dostatečného množství methanolu a je více efektivnější než adiabatické reaktory, které potřebují několik reaktorů v sérii. Abychom zvýšili účinnost a efektivitu u tube-cooled reaktoru, přidáme několik přídatných trubnic pro lepší chladicí efekt.

Čím lépe rozprostřeme distribuci tepla, tím můžeme zamezit problémům s horkými místy, která by mohli poškodit zařízením, tím pádem prodloužit životnost zařízení. [12]

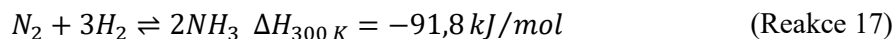
3.2. Syntéza amoniaku

Při syntéze amoniaku využíváme syngas, který je připravován většinou při nižším tlaku, než při jakém je vedena syntéza. Syntézu amoniaku dělíme podle užitého tlaku:

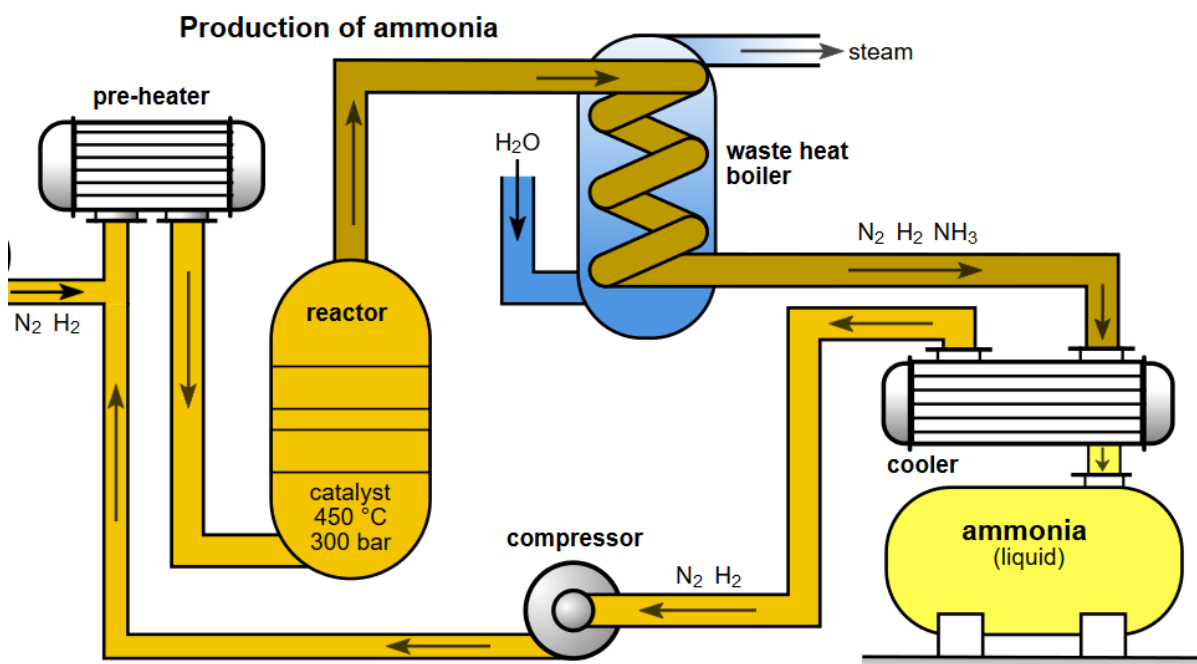
- Nízkotlaké (10-30 MPa)
- Středotlaké (kolem 50 MPa)
- Vysokotlaké (100 MPa)

A však nejčastěji používané jsou nízkotlaké jednotky. [17]

Nejpoužívanější metodou výroby amoniaku je Haberův-Boschův proces. Proces přeměňuje dusík N_2 na amoniak NH_3 reakcí s vodíkem H_2 , za vysoké teploty $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, za vysokého tlaku a za přítomnosti houbového železa. [20]



Přeměna je hodně exotermická $-91,8\text{ kJ/mol}$, což vysvětluje velké teploty uvnitř reaktoru.



Obrázek 13 Proces výroby amoniaku [18]

Pro maximalizaci výroby amoniaku potřebujeme reakci provádět při menších teplotách, ale čím chladnější reakce je, tím je pomalejší. Výrobce se ale snaží vyrobit co nejvíce, tak dochází ke kompromisu vyšších teplot (snížení účinnosti až na 15 %) a rozumné míry vyrobeného amoniaku. [19]

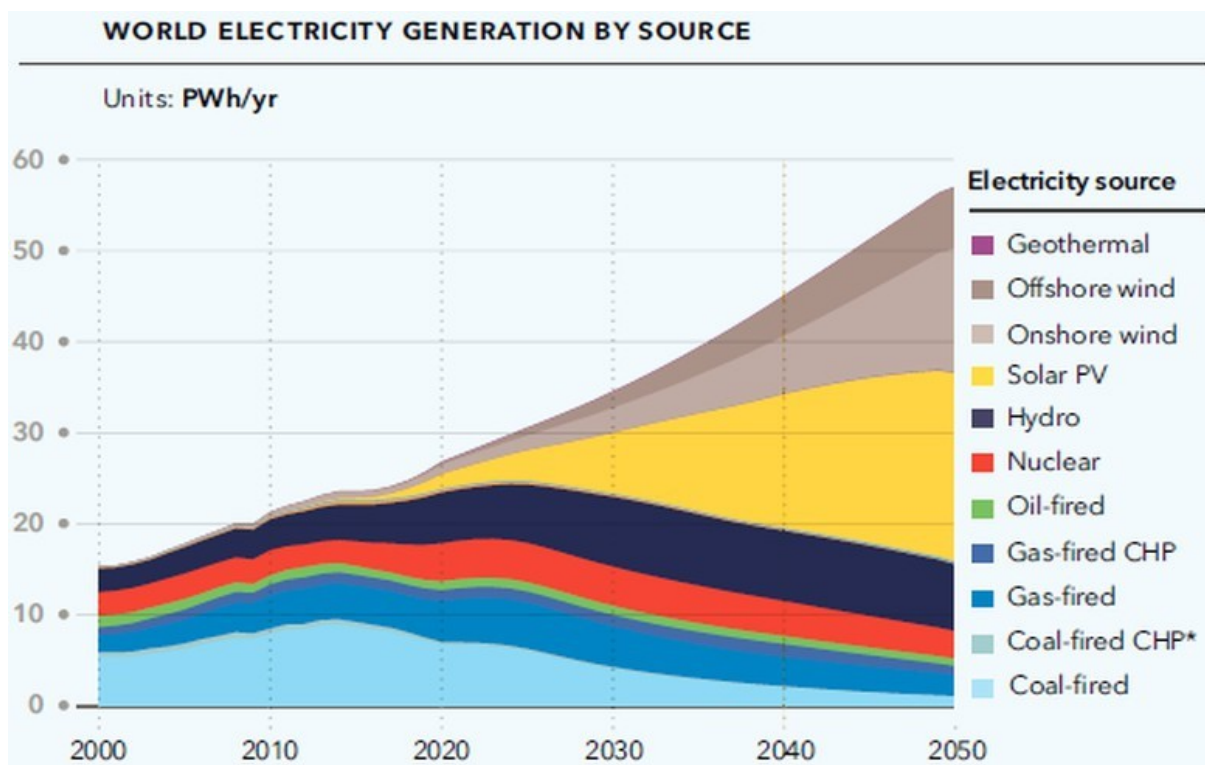
3.3. H2T jako chemická baterie

Abychom vodík skladovali, musíme buď vodík stlačit, mezi 100-700 bary, nebo převést do kapalného stavu, což znamená zmrazit na teplotu okolo $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tyhle způsoby využívají velmi velké množství energie.

Všechnu energii, která je potřebná k výrobě a ke skladování vodíku, můžeme vzít z obnovitelných zdrojů. Vodík ve stlačené podobě má energii okolo 33-40 kWh/kg [22], zatímco nejlepší lithiová baterie na trhu má 280 W/kg [23]. Pokud budeme schopni mnohonásobně zvětšit produkci vodíku, tak zde máme velký potenciál k vyřešení různých problémů v různých aplikacích, například využití vodíku jako chemické baterie. Klasické baterie, ať jsou lithiové, olověné, tak nejsou vhodné pro dlouhodobé skladování energie v rámci několika měsíců, zatímco vodík může být skladován, jak dlouho chceme – měsíce až rok, záleží na provedení technologie uskladnění.

Velkovýrobci elektrické energie už nějakou dobu vyvíjejí koncept, který nazývají Power-to-Gas (P2G), někdy i jako Power-to-Hydrogen, jde o způsob vytvoření a uložení vodíku, a když bude potřeba pokrýt například špičkové odběry v síti, můžeme uložený vodík přeměnit zpět na elektrickou energii, buď vhodnou změnou designu klasické plynové turbíny, nebo elektrolýzou, kde jediný vedlejší produkt je voda. Můžeme nahradit špičkové elektrárny, které využívají fosilní paliva.

Vodík se stává vhodným kandidátem jako doplňující část elektrizační soustavy. Pokud chceme dosáhnout uhlíkové neutrality do roku 2050 podle Pařížské dohody, tak produkce elektrické energie bude hlavně závislá na obnovitelných zdrojích viz predikce Obrázek 14. Výroba elektrické energie bude přesměrována na solární a větrné elektrárny. Nevýhodou solárních a větrných elektráren je závislost na externích vlivech jako jsou: počasí, denní hodina, roční období atd. Zde přichází potenciál využití vodíku, jako skladovacího média. Když solární nebo větrné elektrárny vyrábí přebytečné množství energie můžeme tuto energii přesměrovat na výrobu a uskladnění vodíku. Takto uskladněný vodík můžeme využít buď přes zimní měsíce nebo když bude potřeba.



Obrázek 14 Predikce světové výroby el. energie z různých zdrojů [24]

3.4. Vytápění

Jedna z mnoha výzev je snížit emise uhlíku pro vytápění objektů do roku 2050. Patrně největší výzvou bude snížení emisí, u již existujících budov, které jsou závislé na dodávce plynu pro plynové kotle sloužící jako hlavní zdroj tepla. Plynové kotle jsou zatím nejpohodlnější a nejlevnější řešení ve srovnání s nízko emisními alternativami.

V roce 2016 britská agentura Committee on Climate Change (CCC) zveřejnila zprávu, která se zabývala identifikací různých způsobů na snížení emisí z vytápění budov.

- Zvyšování energetické účinnosti stávajících budov:
- Novostavby
- Tepelné čerpadla v budovách nezávislých na dodávce plynu
- Místní síť
- Bio-methan

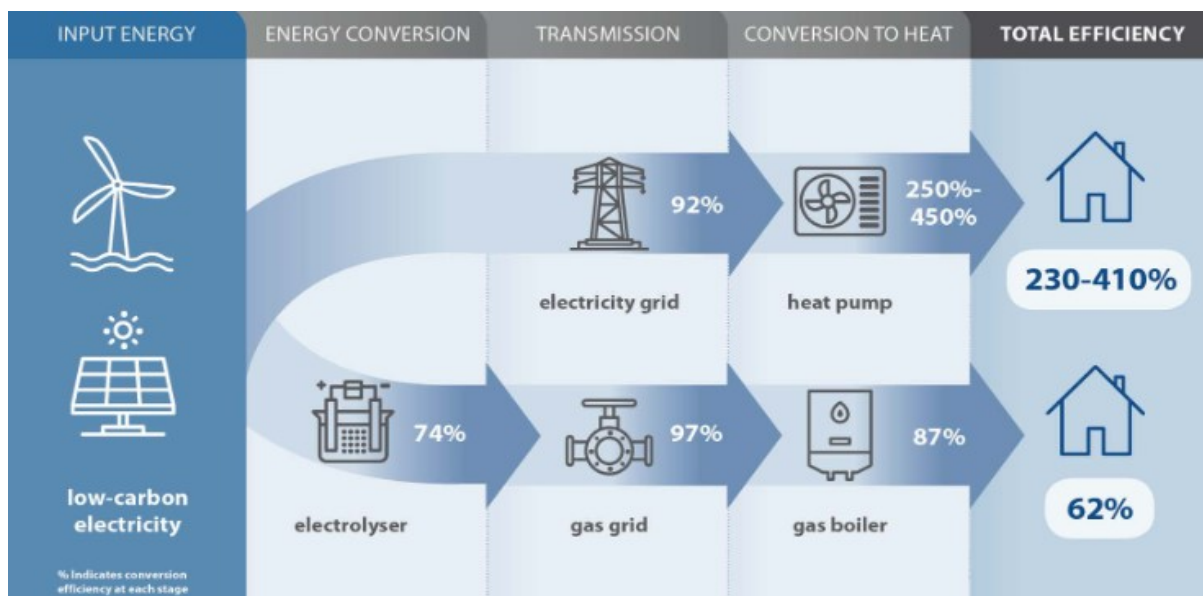
I když tyto způsoby by pomohly pomoci s redukcí emisí uhlíku u budov nepřipojených k distribuční plynové soustavě, tak zde pořád zbývají budovy s připojením do plynové soustavy.

Zde přicházejí dvě řešení na snížení emisí u objektu připojených k plynové distribuční soustavě. Elektrizovat dodávku tepla použitím tepelných čerpadel nebo použít již stávající plynovou síť na přenos vodíku, místo zemního plynu. [25]

3.4.1. Hybridní systém: Vodík x Telené čerpadlo

Systém kombinující tepelné čerpadlo a kotel, buď přímo na spalování vodíku, nebo elektrický kotel napájen palivovými články. Pokud tepelné čerpadlo nebude schopno dodat požadované teplo (např. studené zimní dny), tak to zabudovaný systém rozezná a přepne na výrobu tepla z kotle.

Technologie kotle na spalování vodíku je zatím v začátcích. I když klasické kotle na zemní plyn by mohli pracovat na směsi zemního plynu a vodíku, tak to nevyřeší problém dekarbonizace. Kdybychom chtěli kotle přímo na vodík, tak potřebujeme jiný typ hořáků, protože vodík hoří při vyšších teplotách, má vysokou rychlost šíření plamene, velkou difuzivitu a při hoření s kyslíkem má vyšší emise oxidů dusíku NO_x. Je snaha pro vývoj katalických kotlů, které eliminují problém NO_x, ale jsou méně účinné a vyžadují vyšší čistotu vodíku. Všechno toto představuje technickou výzvu na vývoj nových účinnějších a bezpečnějších technologií. Bylo by nutné přizpůsobení celé plynové distribuční sítě. [25, 27]



Obrázek 15 Porovnání účinnosti mezi tepelnou pumpou a vodíkovými boilerly v případě využití čisté energi, i když v praxi se účinnosti můžou lyšit, tak můžeme vidět, že tepelné pumpy jsou účinnější než vodíkové boilerly. [25]

Druhé řešení, které zahrnuje palivové články můžeme už najít i na trhu, ale největším problémem této technologie řešení výroby vodíku. Protože vodík se vyrábí na místě, kogeneračními jednotkami ze zemního plynu, a to přináší emise CO₂, které se snažíme omezit. [26] **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** porovnává různé typy palivových článků.

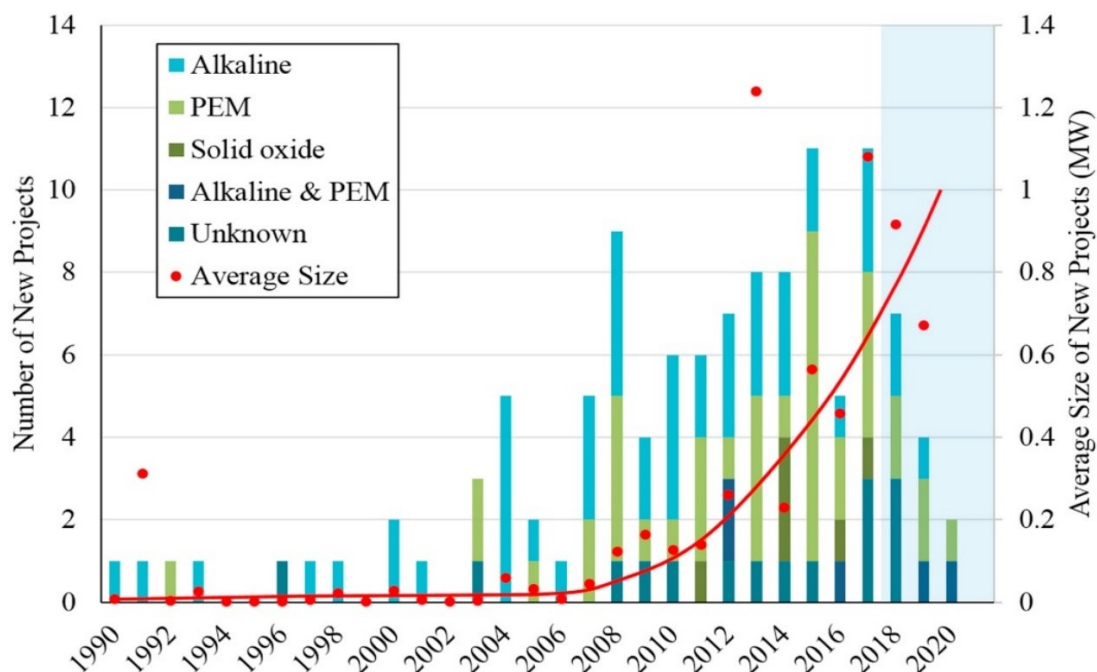
Tabulka 1 Porovnání různých druhů palivových článků v různých oblasti použití. [28]

Druh palivového článku		PEMFC	SOFC	PAFC	MCFC
Oblast využití		Obytné	Obyt/Komerční	Komerční	Komerční
Elektrická kapacita	(kW)	0,75-2	0,75,250	100-400	300+
Tepelná kapacita	(kW)	0,75-2	0,75-250	110-450	450+
Elektrická účinnost	(%)	35-39	45-60	42	47
Teplotní účinnost	(%)	55	30-45	48	43
Životnost	(10 ³ hodin)	60-80	20-90	80-130	20
	(rok)	10	3-10	15-20	10
Míra degradace	(rok ⁻¹)	1 %	1-2,5 %	0,5 %	1,5 %

3.5. P2G a HIGG projekty po celém světě

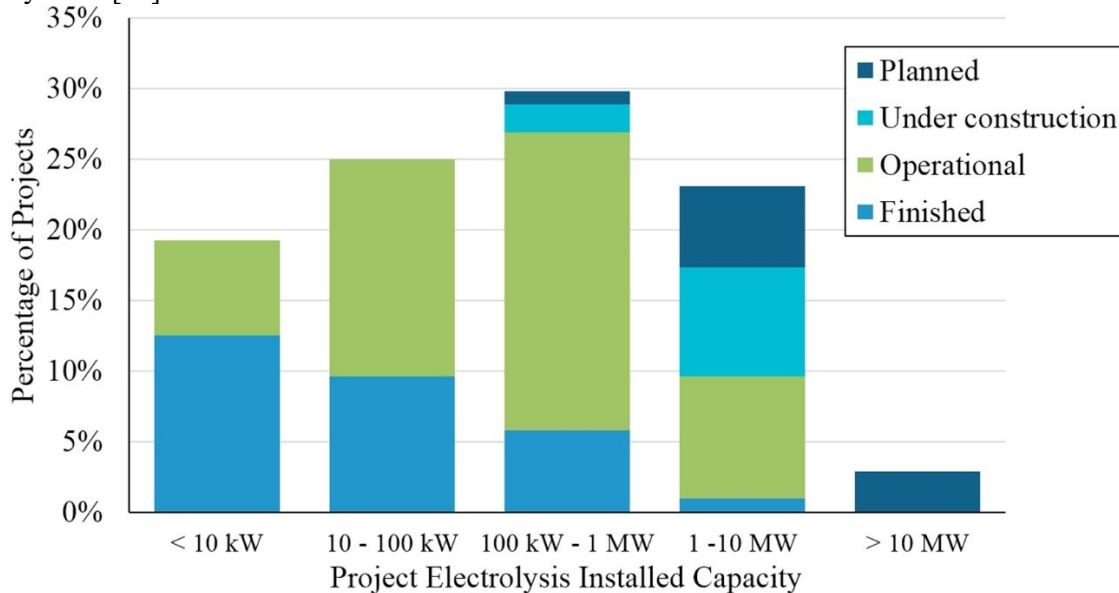
3.5.1. Power-To-Gas (P2G)

Na světě se nachází přibližně 130 P2G projektů, která jsou čistě založena je elektrolýze. Projekt P2G začal na počátku 90. let a každým rokem se projekty zvětšovali. Mezi léty 2000 a 2010 byl vyvinut nový typ elektrolyzérů PEM. Z počátku a až do roku 2010 nejvyžívanější elektrolyzér byl alkalický a v dnešní době nejpoblárnější technologie je PEM. [29]



Obrázek 16 Časová osa P2G projektů uvedených do provozu, k roku 2018. [29]

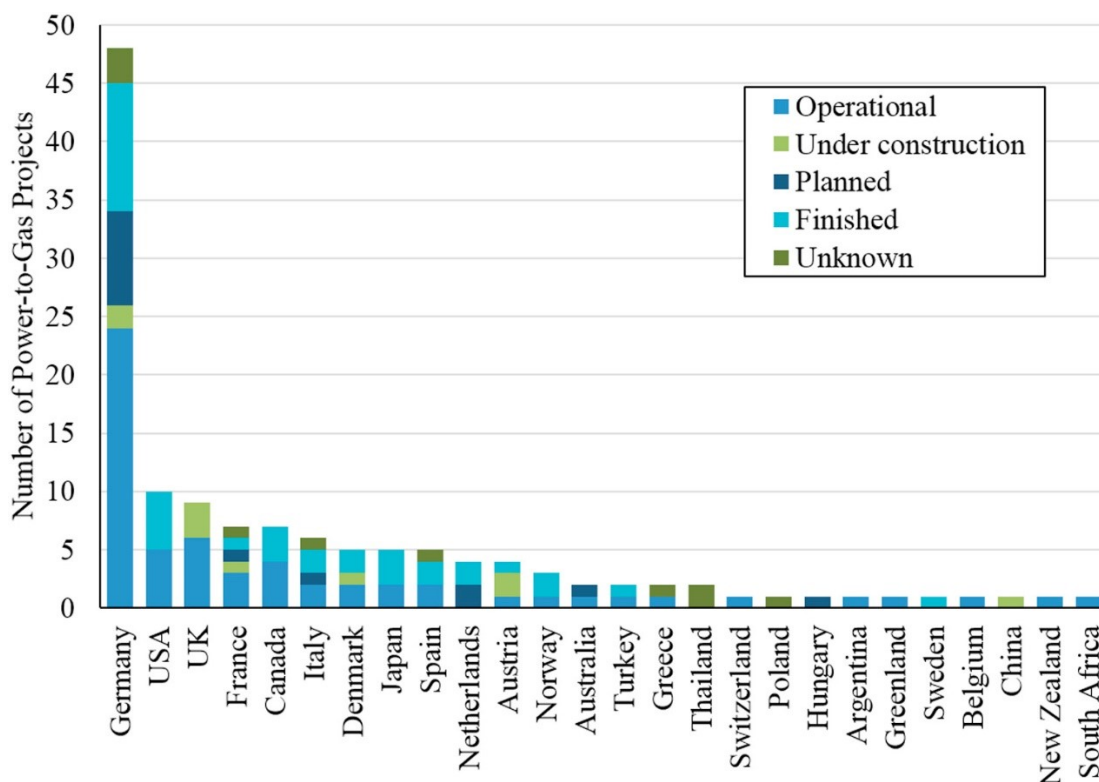
Z Obrázek 16 lze vyčíst, že průměrná velikost P2G projektů každým rokem roste. Skládáním alkalický elektrolyzérů můžeme dosáhnout kapacity výkonu až 6 MW. PEM elektrolyzéry mají menší kapacitu výkonu okolo 2 MW. Ale můžeme je taktéž skládat několik modulů PEM elektrolyzérů za sebou pro zvýšení kapacity až na desítky MW. Na Obrázek 17 jsou rozdělené projekty dle kapacity výkonu. [29]



Obrázek 17 Jmenovité výkony elektrolyzérů. [29]

Největší Evropský P2G průmyslový závod v provozu je Audi E-gas, který se nachází v Wetle, Německo. Kapacita elektrolyzérů je 6,3 MW. Napájení je zajištěno větrnou energií. Největší plánovaný projekt bude ve Francii s kapacitou až 100 MW.

Největší množství P2G projektů se nachází v Německu, jak je ukázáno na Obrázek 18.



Obrázek 18 Množství rozšíření P2G projektů po celém světě. [29]

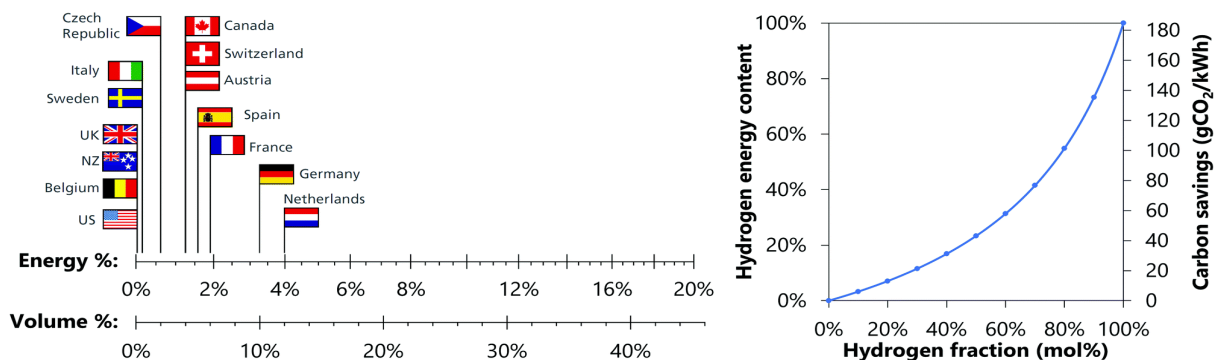
3.5.2. Vmíchání vodíku do dodávky zemního plynu (HIGG)

Jestliže vodík je vyráběn ze zdrojů obnovitelné energie nebo z fosilních paliv s technologií zachycení a uskladnění uhlíku (CCS), tak dodávání vodíku do dodávek zemního plynu má několik benefitů: [35]

- Redukci skleníkových plynů způsobené plynovou distribuční soustavou až o 6 % při vmíchání 7 % vodíku. [25]
- Dodávka pro automobilové aplikace bez stavění nezávislé distribuční sítě čistě pro vodík.
- Ekologizace zemního plynu, když směs vodíku a zemního plynu je využita už stávajících spotřebičích pro generování elektrické energie a tepla.

Problémem s přímým přidáváním vodíku do plynové sítě je, že vodík urychluje křehnutí materiálu železa a oceli, ze kterého jsou vyrobené trubky pro přenos plynu. Z různých studií vyplývá, že bezpečné množství vodíků míchaného do soustavy může být 15-20 % [36].

Německo a Nizozemí přidávají 10-12 % vodíku do plynové distribuční soustavy porovnáním USA a Velká Británie přimíchávají necelé 0,1 % vodíku. [28]



Obrázek 19 Obrázek vlevo ukazuje limity vmíchávání vodíků do plyné sítě. Obrázek vpravo ukazuje vztah mezi obsahem vodíku a úspory CO₂. [28]

K roku 2018 do plynové distribuční sítě, buď dodává nebo je plánováno 25 projektů, což činí asi 18 % P2G projektů. Výpis některých projektů viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**:

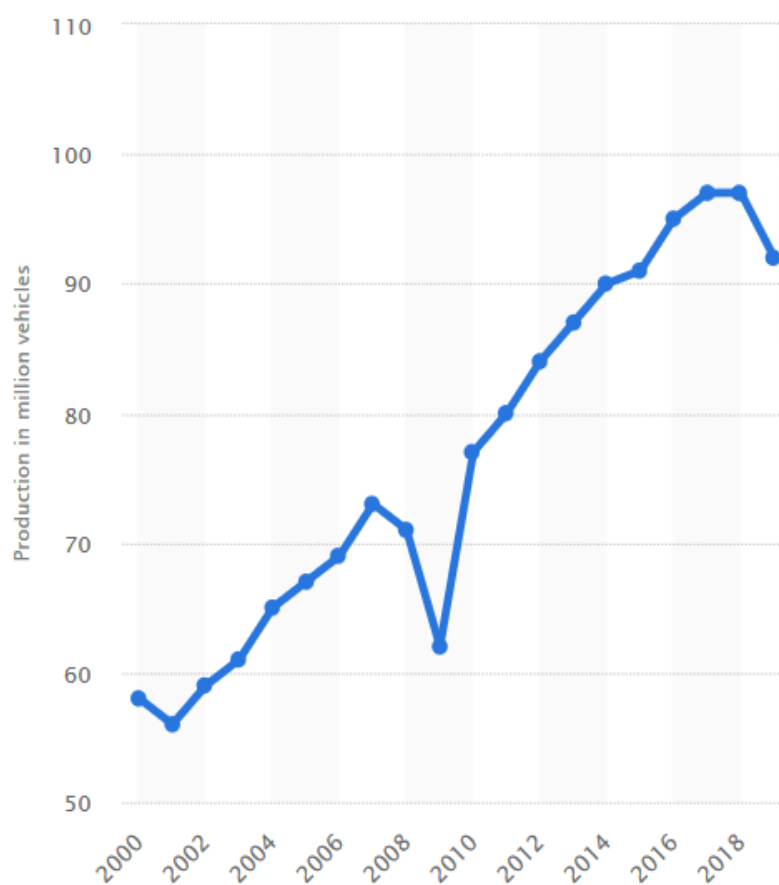
Tabulka 2 Výpis některých HIGG projektů, buď v provozu, nebo plánu. [36]

	Začátek projektu	Stav	Typ elektrolyzátoru	Velikost (kW)	Literatura
Lolland Hydrogen community, Dánsko	2007	Provozu	PEM	104	(31)
WindGas Faklenhagen, Německo	2013	Provozu	Alkalický	2000	(32)
Energiepark Mainz, Německo	2015	Provozu	PEM	3750	(33)
H2V Product, Francie	2021	Plánováno	Alkalický	100 000	(30)
Kidman Park, Austrálie	2018	Plánováno	PEM	180-300	(34)

4. Využití H2T v oblastní autodopravy

Tesla se stala pionýrem bateriové technologie. Ale jak jsme z médií mohli postřehnout Tesla měla nemalé problémy se včasnou dodávkou více jak půl miliónů předobjednávek Modelu 3 v roce 2018. Vlastní produkce výrobků zapříčinila zpoždění za zpožděním. Na začátku roku 2018 produkce elektrických automobilů Tesla Model 3, byla 1000 aut týdně, tohle číslo se postupem času zvyšovalo, až dosáhlo požadované úrovně 5000 aut týdně. Což znamená, že odběratelé, kteří si objednali auto mezi posledními v roce 2018 museli čekat přibližně do prvního kvartálu roku 2020. [38]

Minulý rok bylo vyrobeno více jak 92 miliónů nových osobních automobilů. To je více než 1,67 miliónu týdně. Nezáleží, jak úspěšná bude jedna firma, jestliže se nevyrovnají s výrobou tradičních osobních automobilů na fosilní paliva. [39]



Obrázek 20 Graf počtu vyrobených konvečních spalovacích autmobilů, za rok 2019. [39]

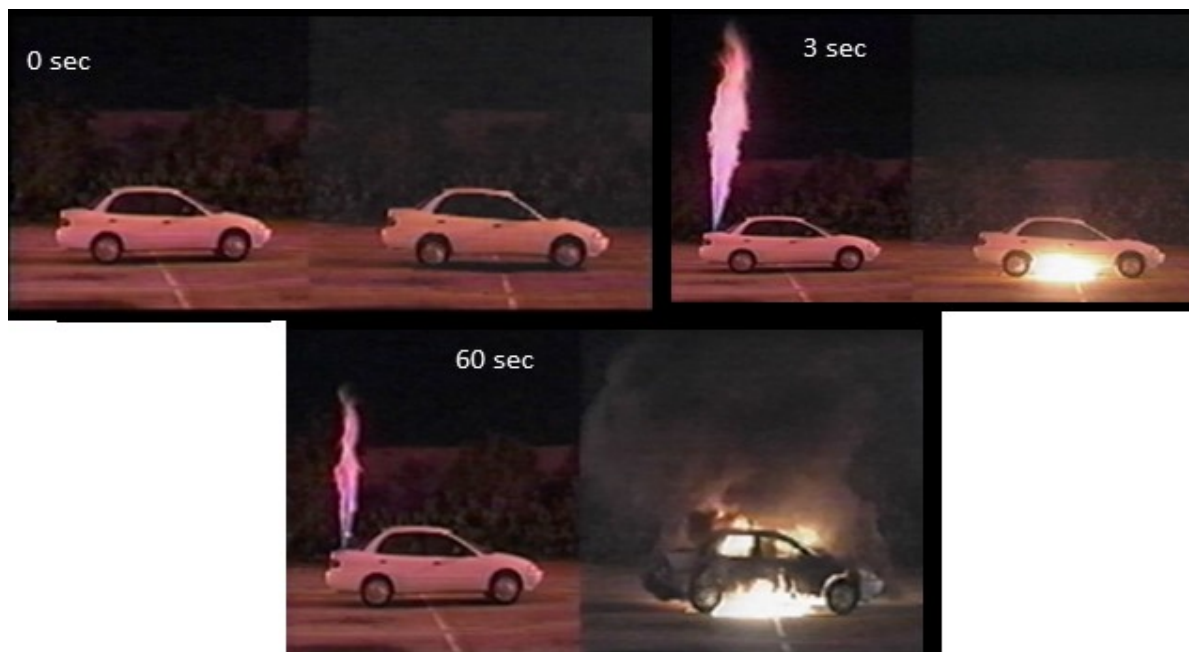
Automobilový průmysl nejspíše nebude schopný vyřešit tenhle problém pouze bateriovou technologií. Poptávka po lithiových bateriích roste rychleji, než je dodávka lithia. Což znamená, že je potřeba dalších technologií pro vyřešení problému. Technologie, která opomíjena, ale mohla by nás odpoutat od závislosti na fosilních palivech je vodík. Největší zásluhu pro vývoj této technologie má automobilová společnost Toyota, Hyundai, Honda a ropná společnost Shell, které investovaly do této technologie a snaží se vytvořit průmysl okolo vodíku.

Proto aby se vodík stal vhodným náhradním energetickým zdrojem za fosilní paliva. Musí splňovat tyto 3 podmínky:

- Bezpečnost
- Vybudování Infrastruktury
- Cena

4.1.1. Bezpečnost

Jestli se vodík jako palivo ve velkém měřítku rozšíří na silnice, tak nesmí být jenom bezpečné, ale musí být veřejností viděno bezpečně (příklad špatné ukázky Hindenburg). Fakt, že vodík je pod tlakem v tlakových lahvích může vzbuzovat strach, že nastane exploze tlakové láhve. Ale různé testy a experimenty ukázali, že se nemusíme bát. V případě požáru vozidla můžeme vodík vypustit pomocí nouzových tlakových ventilů. Vodík se nebude hromadit kolem vozidla a případné vznícení nepohlí pasážéry vozidla. [40]



Obrázek 21 . Porovnání bezpečnosti v případě požáru H_2 vozidla (vlevo) a vozidla na plyn (vpravo). [40]

Nádrže jsou vyrobené uhlíkových vláken o tloušťce 5 cm. Toyota vyzkoušela jejich nádrž z uhlíkových vláken, prostřelit puškou ráže 50. Nádrž neexplodovala jednoduše vypustila lehčí plyn do atmosféry. [40] Auto společnosti Hyundai poháněné vodíkem si vysloužili cenu za nejbezpečnější automobil v kategorii SUV. Vodík je pravděpodobně bezpečnější než benzín, zemní plyn a tak dále. Takže bezpečnost není takovým problémem.

4.1.2. Infrastruktura

Bateriemi poháněné elektro automobily (BEV) mají obrovský náskok v tomto okamžiku. Elektrická síť, ze které jsou BEV napájeny je již postavená. A instalace nabíječky na příjezdové cestě nebo v garáži není velkou překážkou. Na druhou stranu vodík takový komfort nemá. Jsou dvě možnosti distribuce vodíku na čerpací stanice. První možnost je výroba vodíku na místě. Druhá možnost dodávky z centralizovaného místa výroby pomocí nákladních automobilů, buď se stlačeným, nebo kapalným vodíkem, či systém potrubí viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

Tabulka 3 Přehled transportu a distribuce vodíku různými technologiemi. [28,41]

Distribuce	Kapacita	Vzdálenost transportace	Přenosové ztráty	Fixní cena	Variabilní cena
Místní výroba	Malá	Žádná	Malé	Malá	Vysoká
Nákladní automobily se stlačeným vodíkem	Malá	Malá	Malé	Malá	Vysoká
Nákladní automobily s kapalným vodíkem	Střední	Velká	Vysoké	Střední	Střední
Dodávka potrubím	Velká	Velká	Malé	Vysoká	Malá

4.1.2.1.Přeprava stlačeného vodíku

Pro menší poptávka, více méně pro nastartování infrastruktury pro přepravu z centralizovaného místa výroby. Velké nákladní automobily dokážou unést až 1 t vodíku při stlačení na 500 barů. Můžou být použité jako místní stanice na tankování, což redukuje náklady čerpací stanice na skladování a kompresi. Nicméně takové využití je velmi časově nákladné a musí se čekat na zpětné naplnění [27]. Toto řešení při zvýšení poptávky začíná být méně ekonomicky výhodné, ale jako krátkodobé řešení je velmi cenově atraktivní. [42]

4.1.2.2.Přeprava kapalného vodíku

Cisterny můžou převážet obvykle okolo 2-7,5 t, jenže takové řešení představuje další náklady na bezpečnost [42]. I přes zájem použití kapalného vodíku pro osobní automobily, vypařování má za následek velké skladovací ztráty u osobních automobilů a může představovat případné riziko v uzavřených prostorech [43]. Kapalným vodíkem jako palivo by mohli využít velké lodě, nákladní automobily atd.

4.1.2.3.Potrubí na vodík:

Potrubí je velmi účinnou metodou transportu na krátké vzdálenosti [42]. Na světě je již užíváno více jak 3 000 km vysokotlakého potrubí na vodík pro průmysl [42]. Ale vysoká cena zabraňuje k další výstavbě nového potrubí.

Velká cena a zatím malé využití může způsobit odložení financování [42]. Protože klasické ocelové potrubí, které se využívá pro transport zemního plynu, methanu může začít selhávat díky vodíkové křehkosti [44]. Proto je nutnost rekonstruovat či postavit nové potrubí z vyšší třídy oceli [45]. Nové nízkotlaké polyetylenové potrubí, které je v dnešní době stavěno napříč Velkou Británií a Evropu za účelem přepravy zemního plynu může být později využito i na přepravu samostatného vodíku, neboť při nízkém tlaku křehnutí není problém [46,47]. Polyetylenové potrubí je zatím stavěno na 7 barů, ale s dalším vývojem se uvažuje okolo 17 barů. Životnost se odhaduje na 50-100 let. [42]

4.1.2.4.Místní (vlastní) výroba:

I přes malou kapacitu, samo výrobní plnicí stanice má obří výhodu oproti zásobování nákladními automobily, a to je cena. Když v okruhu čerpací stanice není žádné velké výrobní místo vodíku, tak cisterny s vodíkem by museli dovážet vodík z větší vzdálenosti, což by stálo více peněz. Proto když vyrábíme vodík namísto ušetříme spoustu financí, které by byly nutné investovat do dopravy. Společnost Shell s jejich partnerskou společností ITM Power otevřeli v roce 2018 první anglickou komerční čerpací stanici na vodík, vyráběný a skladovaný na místě. Produkce zařízení je 80 kg za den [49].

4.1.3. Cena

Aby se vodík stal atraktivním zdrojem paliva musí se cena vyrovnat cenám fosilních paliv. V dnešní době cena za kilo vodíku je 250-400 Kč, průměrná spotřeba na 100 km u aut s Fuel Cell (FC) technologií je 0,95 kg na 100 km. Porovnání s naftovým motorem se spotřebou 5,1l/100 zaplatíme za stejnou vzdálenost přibližně 120 Kč. Můžeme očekávat, že cena vodíku se postupně bude snižovat. Odhaduje se, že mezi roky 2020-2025 cena vodíku spadne na hranici 200 Kč/kg [50,51].

4.2. Hnací ústrojí vodíkových motorů

Konvenční spalovací motor se dá modifikovat na spalování čistého vodíku (VKSM). Vodíkový spalovací motor má menší účinnost než automobily s technologií Fuel Cell a jako emise jsou oxidy dusíku NO_x, takže nemůžeme očekávat, že se tenhle způsob získávání energie bude mít dlouhodobé využití. Taktéž můžeme využívat spalovací motory na vodík vmícháván do zemního plynu. Ale jestli bude požadována kompletní dekarbonizace, tak tyto motory budou nahrazeny bezemisními alternativami. [52]

Technologie Fuel Cell (Fuel Cell electric vehicle=FCEV), využívá PEM palivový článek s velkou účinností, vyšším měrným výkonem, nulovými emisemi a možnost studeného startu [52].

Porovnání technologie FCEV s konvenčním spalovacím motorem na fosilní paliva (KSM) a elektrické automobily poháněné bateriemi (BEV). Viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

Tabulka 4 Porovnání technologie FCEV s konvenčním spalovacím motorem na fosilní paliva (VKSM) a elektrické automobily poháněné bateriemi (BEV). [28]

	VKSM	FCEV	BEV
Aktuální pořizovací cena	Malá	Vysoká	Střední
Cena Paliva	Střední	Vysoká	Malá
Cena údržby	Vysoká	Malá	Malá
Potřebná infrastruktura	Malá	Velká	Střední
Emise	...	•	•
Účinnost	Malá	Střední	Velká
Dojezdová vzdálenost	Velká	Velká	Malá
Rychlost tankování	Vysoká	Vysoká	Malá
Životnost	Velká	Velká	Střední
Zrychlení	Střední	Vysoké	Vysoké

Porovnání rozdílů FCEV, BEV, KSM

- 1) Pořizovací cena: FCEV je zatím 3 – 5násobně vyšší než pořizovací cena BEV. Například Toyota Mirai nebo Hyundai Nexo stojí okolo 1,5mil Kč [53,54] oproti BEV, kde u automobilu Renault Zoe je pořizovací cena 350 000 Kč [55]. Pokud se podaří zvýšit produkci a zmenšit výrobní cenu. Pokud se tak stane cena FCEV klesne a má potenciál, že se stane i levnější alternativou než BEV [56,57].
- 2) Dojezdová vzdálenost a rychlost tankování: FCEV dojezdová vzdálenost je mezi 500-600 km na jedno natankování a rychlost natankování se rovná rychlosti tankování benzínu či nafty okolo 3-5 minut [52]. Zatím co BEV dojezdová vzdálenost je mezi 100-300 km a je ovlivněna klimatizací/topením. A typická rychlost nabíjení je okolo 30-45 min.
- 3) Životnost: u FCEV se řeší jen opotřebení PEM elektrolyzérů (8 000 hodin) [58], neboť tlakové láhve nejsou ovlivněny častým tankováním. Mezitím u BEV klasická životnost baterií je <5 let, navíc jsou ovlivněny i klimatem, přebíjením, rychlým vybíjením atd. [59]
- 4) Emise: jedinou emisí u FCEV je voda, teda jestli je vodík vyráběn z obnovitelných zdrojů nebo fosilními palivy s technologií CCS, to samé platí pro BEV.

4.3. Plnicí stanice

Jedna z velkých komplikací vodíkových vozů je nedostupnost tankovacích stanic, proto je nutná rozsáhlá expanze plnicích stanic [71]. V menším měřítku stejnému problému čelily bateriemi poháněná vozidla, ale díky nízké pořizovací ceně elektrických nabíječek se mohla síť nabíjecích míst rozšířit všude, kde je připojení k elektrické soustavě. V České republice je dnešní době přibližně 450 nabíjecích stanic a počítá se že do roku 2022 díky dotacím vznikne dalších 375 rychlonabíjecích stanic [70], vodíkových stanic v české republice je zatím jen jedna a není dostupná pro veřejnost.

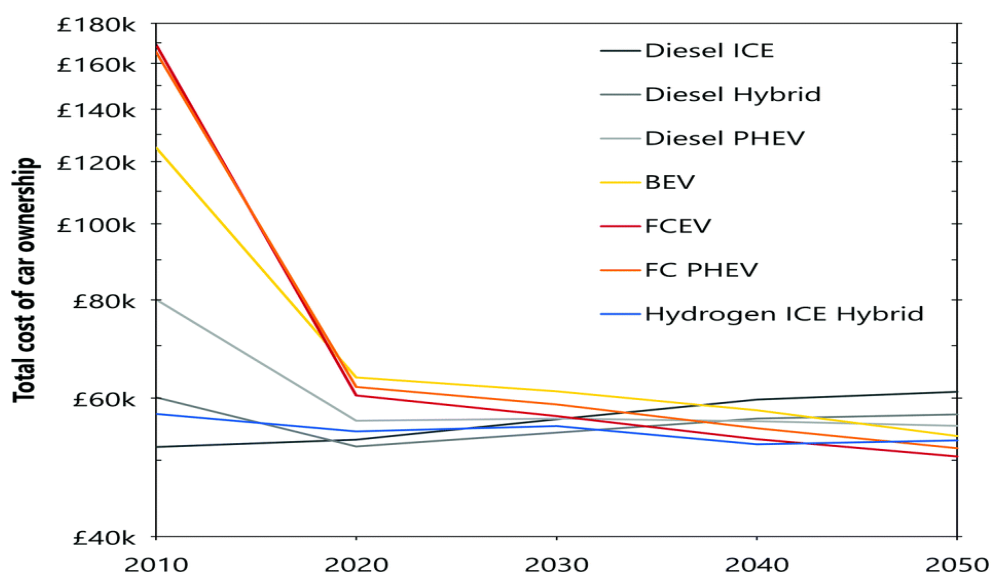
Na konci roku 2019 bylo v provozu 432 H₂ plnicích stanic, z toho 330 dostupných pro veřejnost. A dalších 226 je plánována. V Evropě je dohromady 177 H₂ plnicích stanic z toho 87 v Německu. [72]



Obrázek 22 Mapa vodíkových plnicích stanic. [72]

4.4. Osobní automobily

FCEV jsou i v dnešní době drahé, ale při masové produkci by cena měla klesnout a kolem roku 2030 by cena měla být konvergující s ostatními pohony [56,60,61,62,63,41]. Viz Obrázek 23.



Obrázek 23 Predikce překrytí cen automobilů na různé pohony. [56]

Jeden z důvodů, proč FCEV jsou tak drahé je z důvodu, že je zde použita platina cca okolo 30-60 g, naftový katalyzátor potřebuje okolo 6-7 g platiny. Firma Bosch se chystá roku 2022 uvést na trh nový druh Fuel Cell do automobilů, který bude využívat jenom desetinu množství platiny co se využívá dnes. Jedno z nejlépe prodávaných FCEV dnešní době je Toyota Mirai, kde se očekává u nové verze snížení obsahu platiny až o 30 % [64,65,66].

Aby došlo k rovnosti cen, tak by produkce měla činit 100 000 Full Cell automobilů za rok. Byl by to jen nepatrné proniknutí do automobilové trhu (viz nahoře co bude), ale pro FCEV technologii by to představovalo značný pokrok. [67]

Dnešní největší producenti FCEV jsou: Toyota, Hyundai a Honda. Firma Audi se chce roku 2021 dostat, taktéž na trh s FC technologií [68,69]. I když FCEV technologie je jen v pár státech na světě, z důvodu nedostačující infrastruktury, tak se dokázalo prodat okolo 3 000 FC automobilů. Agentura IEA usuzuje, že do roku 2030 prodeje FCEV by mohly překročit 8 miliónů vozidel a 150 miliónů do roku 2050. [47]

4.5. Ostatní silniční transport

FCEV čelí silné konkurenci od VKSM a BEV v oblastní osobních automobilů, tak se nabízí asi nejlepší možná i jediné řešení pro nulové emise uhlíku v těžkých vozidlech (autobusy, nákladní vozidla) [67]. Rostoucí výzvy k minimalizaci znečištění ovzduší a snížení hluku ve městech volají k využití vodíkem poháněné autobusy [72]. Tím že se vozidla vrací zpět na stejná místa znamená, méně plnicích stanic a lepší utilizace ceny paliva.

Klíčový rozdíl pro těžkou dopravu je malý výrobní objem, potřeba pro dlouhou životnost a vysokou hustotou energie.

4.5.1. Fuel Cell Autobusy (FCA)

FCA je atraktivní a docela vyspělou technologií. Tím, že máme více místa, neboť nádrž je umístěna na střeše a dokáže unést až 40 kg vodíku, můžeme skladovat vodík při tlaku 350 bar. Ušetříme na nádrži a na energii potřebné ke stlačení. Celkové náklady na vlastnictví můžou být o 10-20 % vyšší než u naftových autobusů do roku 2030, ale při vyšším využití a nasazení FCA může dojít ke zmenšení ceny. [27,74]

Za posledních 15 let FCA najeli přes 7 mil km jen v Evropě. Nicméně v evropském provozu je jen 91 Fuel Cell autobusů [80]. Toyota plánuje dodat na olympijské hry v Japonsku 100 nových autobusů (81). Největší Fuel Cell autobusový trh se nachází v Číně, kde si objednali přes 300 kusů FCA do města Fo-šan [82].

Velký pokrok nastal i zvyšování životnosti. V Londýně operuje 10 autobusů poháněné technologií FC a některé z nich mají již přes 20 000 naježděných hodin [75]. Dostupnost Fuel Cell autobusů již překročila stanovený cíl 85 % [83].

4.5.2. Nákladní vozidla

Ukazují ohromný potenciál na adoptování technologie Fuel Cell, neboť vysoké energetické nároky vozidel znamená méně proveditelných nízko emisních alternativ. Pro lehčí nákladní vozidla na kratší vzdálenosti můžeme použít baterie, tak těžká vozidla na dlouhé vzdálenosti si nejspíše osvojí vodíkovou technologii [27]. I když kompetitivnost baterií roste s nákladním automobilem Tesla Semi s dojezdem mezi 400-800 km za cenu ~ 4,5 mil korun [75]. S relativní malou objemovou výrobou se cena může rovnat s ostatními nízko emisními alternativami. Pro vozidla, které se vrací zpět do depa by vystačila jen jedna plnicí stanice, ale pro nákladní automobily na dlouhé vzdálenosti by byla potřeba výstavby sítě plnicích stanic.

Důležitým faktorem je životnost, nebo nákladní vozidla musí ujet dlouhé vzdálenosti, se zaměřením na prodloužení životnosti Fuel Cell modulů až na 50 000 hodin provozu. Taktéž velmi důležitá je účinnost a nízká cena paliva. Kenworth a Toyota zvažují produkci nákladních automobilů [76,77], americká firma Nikola již vyvíjí nákladní automobil na kapalný vodík [78]. Aby se vyhýbalo motoru na

volnoběh, vyvíjejí FC jako pomocný zdroj energie, pro nákladní vozidla, který by mohl napájet spotřebiče a různé další elektrické zařízení (například: topení, klimatizace, osvětlení atd...) [79].

4.6. Nesilniční transport

4.6.1. Vlaky

Vlaky na vodík by se dali využít v případě, kde elektrifikace sítě je nemožná nebo by byla příliš drahá [27]. Německo začalo testování roku 2018 a chystá se objednat 27 nových FC vlaků. [85]

5. Technologie H2T v podmínkách ČR

Rozvoj vodíkové technologie v ČR se datuje na rok 2006, kdy nastala iniciace platformy HYTEP ministerstvem dopravy a průmyslu. Oproti vyspělým státům EU měla ČR asi 15 let skluz. [86] Pomalu ale jistě Česko začíná tuhle mezeru zmenšovat.

5.1. Česká vodíková technologická platforma (HYTEP)

Platforma HYTEP vznikla pro podporu subjektů, které se účastní vývoje vodíkových technologií.

Cíl platformy je vybudování a nastartování vodíkového hospodářství ČR. Poskytuje profesionální poradenství jak soukromím, tak státním subjektům ohledně vodíkové technologie. Platforma, taktéž poskytuje lepší interakci mezi akademickou a průmyslovou sférou. Než se vodík prosadí na světovém, tak na českém trhu, musí nejprve získat financování z různých zdrojů pro překonání tzv. „valley of death“ neboli údolí smrti to znamená dotace/financování jsou nepostradatelnou součástí v období, kdy projekt operuje v plné míře bez generování příjmů. Díky podpoře z EU s ČR stalo nejaktivnějším členem z nových členských států EU. [86,87,89]

5.2. Očekávaný vývoj podle NAP CM

V roce 2015 byl vydán akční plán čisté mobility, který byl později v roce 2020 aktualizován zasedáním Vlády. Důvod, proč došlo k aktualizaci původní NAP CM, lze považovat přijetí tzv. Pařížské dohody o změně klimatu. Nové aktualizované vydání NAP CM obsahuje rozsáhlejší kapitulu o vodíkových technologiích. [88]

NAP CM predikuje, že do roku 2030 bude na českých silnicích 870 ks autobusů a přibližně 58 000 osobních automobilů na vodíkový pohon. K tomu odpovídající infrastrukturu, kde je předpovídáno 80 vodíkových plnicích stanic k roku 2030. [88]

5.2.1. Cíl

NAP CM si jako prioritní a prvotní cíl zvolilo autobusovou dopravu, neboť s různých analýz vyplývá, že menší 8 % investice přinese snížení emisí CO₂ do ovzduší až o 32 % při použití jen autobusové dopravy na vodík. Cílem je že do roku 2025 by mělo být na silnicích a městech 95 vodíkových autobusů a do roku 2030 by se číslo mělo zvětšit až na 870 kusů. Finanční náročnost projektu by měla být financovaná jak z veřejných, tak i soukromých subjektů. Mělo by být vynaloženo cca 2,4 mld. Kč. [88]

Většina peněz by měla být získána z veřejného sektoru převážně z Evropských fondů, případně národních zdrojů. Motivace pro nákup FCA v budoucnosti však bude potřeba, neboť se musí naplnit požadavky novely směrnice 2009/33 o podpoře čistých vozidel, zejména požadavek, aby 50 % dopravy byl bezemisní. [88]

Pro splnění cíle bude, taktéž nutnost poklesu ceny FCA. Narovnání rozdílu ceny mezi vodíkovým pohonem a konvenčním spalovacím pohonem. [88]

5.3. Plnicí stanice

V Česku zatím existuje pouze jedná neveřejná stanice na 300 barů v Neratovicích byla postavena v roce 2009, jako prvotní projekt pro zkoumání využití vodíkového paliva, jako alternativa k fosilním palivům. [87,89] Ale počítá se že do konce roku 2020 by v Česku mohli být až 4 nové plnicí stanice dostupné pro veřejnost. Společnost Unipetrol uvažuje rozšíření o stojany na vodík již ustávajících čerpacích stanic Benzina. [92] Nejbližším projektem společnosti Unipetrol je postavení vodíkové stanice v Litvínově na Mostecku, zdrojem vodíku bude nedaleká chemička. [97] Další stanice vyrosté v Ústí nad Labem, která obdržela dotaci ve výši 30,7 mil. Kč na výstavbu. Zdroj vodíku bude, taktéž nedaleký chemický závod Spolchemie, který vyrábí vodík jako vedlejší produkt. [97]



Obrázek 24 První plnicí stanice v Neratovicích. [87]

Příští rok se počítá s dostavěním a uvedením do provozu plnicí stanice v Moravskoslezském kraji pro 5 autobusů DPO a.s. a 10 autobusů příměstského dopravce. Dopravní podnik Ostrava a.s. zadala zakázku týkající se zpracování investičního záměru s názvem „Rozvoj vodíkové mobility v Ostravě, 1 etapa“. Investice souvisí s možností uplatnění FCA v Ostravě a v okolí. Dále s vybudováním potřebné infrastruktury. To vše má dopravci pomoci zjistit možnou pořizovací a provozovací cenu provozu FCA. Vypáskání zakázky reaguje na memorandum vedení Moravskoslezského kraje a statutárního města Ostravy ve věci podpory vodíkového pohonu v dopravě. [94,96,99] Moravskoslezský kraj ve spolupráci s Německem, taktéž připravuje využití vodíkem napájených vlaků. [98]

Finanční podpora pro stavbu plnicích stanic půjde z Operačního programu doprava (OPD) od ministerstva dopravy. Je vyčleněna z evropských prostředků částka 102 mil. Kč. Ministerstvo dopravy vyhlásilo třetí výzvu dne 30. ledna 2020. Tato výzva navazuje na tu předcházející výzvy a jako cíl si kladou vytvoření páteřní sítě pro elektromobily, vodíkové, CNG, LNG a jiných plnicích stanic. [99]



Obrázek 25 Plánované plnicí stanice na hlavních dopravních tazích ČR. [93]

5.4. Dopravní prostředky

5.4.1. Osobní automobily

Automobilky Toyota a Hyundai slibují zahájení projeje jejich vodíkových automobilů na českém trhu až bude možnost tankování. Můžeme tedy očekávat automobily, jako je například Toyota Mirai nebo Hyundai Nexa. [91,100]

5.4.2. TriHyBus

První český experimentální autobus na vodíkové palivo financovaný z Evropského fondu pro regionální rozvoj, stejně jako Neratovická plnicí stanice, byl vyvíjen již od roku 2006 Ústavem jaderného výzkumu v Řeži (ÚJV Řež). Jde o prototyp s využitím v městské dopravě. Na stavbě autobusu se podílela firma Škoda Electric a.s. Autobus byl využíván na lince městské dopravy v Neratovicích. [101]

TriHyBus, neboť využívá tři různé zdroje energie pro 120 kW elektrický motor:

- Palivový článok o výkonu 48 kW
- Akumulátory Li-ion 28 kWh
- Superkapacitátory využívají rekuperace energie z brzdění.

Závěr

Vodík jako alternativní zdroj energie byl před několika lety velkou neznámou, ale s rozvojem technologií se ukázalo, že vodík je vhodným doplňujícím alternativním zdrojem k dekarbonizaci světa. Ale musíme nejprve vyřešit několik problémů týkající se výroby a distribuce. Jak už víme vodík se do dnešního dne vyrábí primárně z fosilních paliv, ale s pořád zvyšujícím se počtem elektráren na obnovitelné zdroje, můžeme přesunout výrobu s fosilních paliv na čistou bezemisní výrobu z obnovitelných zdrojů.

Vodík je klíčovým blokem i různých chemikálií využívaných denně po celém světě. Co znamená, že můžeme začít vyrábět vlastní chemikálie. Momentálně získáváme chemikálie z fosilní paliv, ale když použijeme vodík jako základní stavební prvek, tak si můžeme udělat vlastní methan, methanol (vodíku a CO₂ z atmosféry), tímto si můžeme vytvářet vlastní paliva. A kdybychom dokázali elektrifikovat letadla, tak můžeme vytvořit uhlíkově neutrální letecký průmysl. To samé s lodní dopravou, automobilovou atd... A klíčem k tady tomu je úžasná molekula a tou je vodík.

Literatura

- [1] TUČEK, Vít, Ludmila DVOŘÁKOVÁ a Jiří HANZAL. *Vodík*. -. Praha: Česká asociace technických plynů, 2004. Informace, normy, předpisy, dok. 3/2004. ISBN -.
- [2] The Future of Hydrogen. *IEA* [online]. 2019 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [3] YILMAZ, Fatih a M. Tolga BALTA. Energy and exergy analyses of hydrogen production step in boron based thermochemical cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2017, **42**(4), 2485-2491 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.04.017. ISSN 03603199. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319916307583>
- [4] *Hydrogen Production: Electrolysis* [online]. Washington, DC: ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>
- [5] *Hydrogen Production* [online]. HydrogenEurope [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-production-0>
- [6] KRÁTKÝ, ŠTĚPÁN. *VÝROBA A USKLADNĚNÍ VODÍKU*. Brno, 2012. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce ING. JIŘÍ HEJČÍK, PH.D.
- [7] Tracking Energy Integration. *IEA* [online]. Paris, 2019 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/tracking-energy-integration/hydrogen>
- [8] KALAMARAS, Christos M. a Angelos M. EFSTATHIOU. Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments. *Conference Papers in Energy* [online]. 2013, **2013**, 1-9 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1155/2013/690627. ISSN 2314-4009. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/archive/2013/690627/>
- [9] Výroba vodíku parciální oxidací. *Petroleum.cz* [online]. petroleum.cz [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-44.aspx>
- [10] *Hydrogen Fuel: Production, Transport, and Storage* [online]. 1. Velká Británie: routledge, 2008 [cit. 2020-05-14]. ISBN 9781420045772. Dostupné z: <https://www.vitalsource.com/za/products/hydrogen-fuel-ram-b-gupta-v9781420045772>
- [11] *ASKJA ENERGY* [online]. Island: ASKJA ENERGY, 2019 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://askjaenergy.com/iceland-introduction/energy-data/>
- [12] MARLIN, Dana S., Emeric SARRON a Ómar SIGURBJÖRNSSON. Process Advantages of Direct CO₂ to Methanol Synthesis. *Frontiers in Chemistry* [online]. 2018, **6** [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.3389/fchem.2018.00446. ISSN 2296-2646. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fchem.2018.00446/full>
- [13] *Methanol Price and Supply/Demand* [online]. 2019 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.methanol.org/methanol-price-supply-demand/>

- [14] Carbon dioxide-to-methanol process improved by catalyst. *ScienceDaily* [online]. ScienceDaily, PennState, June 28, 2018 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.sciencedaily.com/releases/2018/06/180628171435.htm>
- [15] *Carbon Recycling International* [online]. Island [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.carbonrecycling.is/about-us>
- [16] *Cooled tube reactor – Features* [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.vapourtec.com/products/flow-reactors/cooled-tube-reactor-features/>
- [17] *Chemie a technologie sloučenin dusíku* [online]. Ústí nad Labem, - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt1/Chemie_a_technologie_sloucenin_dusiku.pdf. Učební text. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně.
- [18] Haber process. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Haber_process
- [19] THE HABER PROCESS. *Chemguide* [online]. 2013 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://www.chemguide.co.uk/physical/equilibria/haber.html>
- [20] Haber Process for Ammonia Production Chemistry Tutorial. *AUS-e-TUTE* [online]. 2018, 8 April 2018 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.ausetute.com.au/haberpro.html>
- [21] Hydrogen Properties. *Energy.gov* [online]. 2001, 2001, , 16 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/fcm01r0.pdf>
- [22] Energy density. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density
- [23] Renewables produce 85% of global power, nearly 50% of energy in 2050. In: *Renewables Now* [online]. Bulgaria: Renewables Now, 2017 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://renewablesnow.com/news/renewables-produce-85-of-global-power-nearly-50-of-energy-in-2050-582235/>
- [24] *Hydrogen in a low-carbon economy* [online]. Velká Británie, 2018 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2018/11/Hydrogen-in-a-low-carbon-economy.pdf>
- [25] ZILVAR, Jiří. *Topíme a svítíme palivovým článkem, část 1. – zemní plyn* [online]. Česká Republika: tzbinfo, 2019 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://vytapieni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/19027-topime-a-svitime-palivovym-clankem-cast-1-zemni-plyn>
- [26] HART, David, Jo HOWES, Franz LEHNER, Paul E. DODDS, Nick HUGHES, Birgit FAIS, Nagore SABIO a Mark CROWTHER. Scenarios for deployment of hydrogen in contributing to meeting carbon budgets and the 2050 target. *E4tech* [online]. 2015, October 2015, , 65-130 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2015/11/E4tech-for-CCC-Scenarios-for-deployment-of-hydrogen-in-contributing-to-meeting-carbon-budgets.pdf>

- [27] STAFFELL, Iain, Daniel SCAMMAN, Anthony VELAZQUEZ ABAD, Paul BALCOMBE, Paul E. DODDS, Paul EKINS, Nilay SHAH a Kate R. WARD. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science* [online]. 2019, **12**(2), 463-491 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1039/C8EE01157E. ISSN 1754-5692. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C8EE01157E>
- [28] QUARTON, Christopher J. a Sheila SAMSATLI. Power-to-gas for injection into the gas grid: What can we learn from real-life projects, economic assessments and systems modelling? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, **98**(-), 302-316 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1016/j.rser.2018.09.007. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118306531>
- [29] *H2V Product* [online]. Hydrogen Europe: Hydrogen Europe, 2019 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://hydrogeneurope.eu/member/h2v-product>
- [30] GAHLEITNER, Gerda. Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2013, **38**(5), 2039-2061 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.010. ISSN 03603199. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319912026481>
- [31] *Project WindGas Falkenhagen* [online]. Hydrogen Europe: Hydrogen Europe, 2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://hydrogeneurope.eu/project/windgas-falkenhagen>
- [32] *Energiepark* [online]. Německo: -, 2015 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.energiepark-mainz.de/en/project/energiepark/>
- [33] RAMAN, Kristin. *Hydrogen Park South Australia: Delivering today for a better future* [online]. Australie: Australian Gas Infrastructure group, 2019 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.agig.com.au/hydrogen-park-south-australia>
- [34] MELAINA, M. W., O. ANTONIA a M. PENEV. *Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues* [online]. 2013 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51995.pdf>
- [35] *Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks:: A Review of Key Issues* [online]. USA, 2013 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51995.pdf>
- [36] QUARTON, Christopher J. a Sheila SAMSATLI. Power-to-gas for injection into the gas grid: What can we learn from real-life projects, economic assessments and systems modelling? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, **98**(-), 302-316 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1016/j.rser.2018.09.007. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118306531>
- [37] *Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks:: A Review of Key Issues* [online]. USA, 2013 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51995.pdf>
- [38] RANDALL, Tom a Dean HALFORD. Tesla Model 3 Tracker. *Bloomberg* [online]. New York, 2018, May 14, 2020, -(), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.bloomberg.com/graphics/tesla-model-3-vin-tracker/>
- [39] Estimated worldwide automobile production from 2000 to 2019. In: *Statista.com* [online]. New York: Statista, 2020, Apr 1, 2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/262747/worldwide-automobile-production-since-2000/>

- [40] LEACHMAN, Jacob. So just how dangerous is hydrogen fuel? In: *Washington State University* [online]. USA: The Washington State University, 2017 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://hydrogen.wsu.edu/2017/03/17/so-just-how-dangerous-is-hydrogen-fuel/>
- [41] *Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells* [online]. Paris: International Energy Agency, 2015, -(-) [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: [http://ieahydrogen.org/pdfs/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells-\(1\).aspx](http://ieahydrogen.org/pdfs/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells-(1).aspx)
- [42] YANG, C a J OGDEN. Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2007, **32**(2), 268-286 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2006.05.009. ISSN 03603199. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319906001765>
- [43] 2 0 1 4Alexei Kotchourko, Daniele Baraldi, Pierre Bénard, Norbert Eisenreich, Thomas Jordan, Jay Keller, Armin Kessler, Jeff LaChance, Vladimir Molkov, Mark Steen, Andrei Tchouvelev, Jennifer WenSTATE OF THE ARTAND RESEARCH PRIORITIESIN HYDROGEN SAFETY. In: - [online]. Luxembourg: Office of the EU, 2014, s. 1-17 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.2790/99638. ISBN 978-92-79-34719-1. ISSN 1831-9424. Dostupné z: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC84686/soar.pdf>
- [44] ROBERTSON, Ian M., P. SOFRONIS, A. NAGAO, M. L. MARTIN, S. WANG, D. W. GROSS a K. E. NYGREN. Hydrogen Embrittlement Understood. *Metallurgical and Materials Transactions A* [online]. 2015, **46**(6), 2323-2341 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1007/s11661-015-2836-1. ISSN 1073-5623. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11661-015-2836-1>
- [45] VAN DER ZWAAN, B.C.C., K. SCHOOTS, R. RIVERA-TINOCO a G.P.J. VERBONG. The cost of pipelining climate change mitigation: An overview of the economics of CH₄, CO₂ and H₂ transportation. *Applied Energy* [online]. 2011, **88**(11), 3821-3831 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.05.019. ISSN 03062619. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626191100314X>
- [46] NANNINGA, N.E., Y.S. LEVY, E.S. DREXLER, R.T. CONDON, A.E. STEVENSON a A.J. SLIFKA. Comparison of hydrogen embrittlement in three pipeline steels in high pressure gaseous hydrogen environments. *Corrosion Science* [online]. 2012, **59**(-), 1-9 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1016/j.corsci.2012.01.028. ISSN 0010938X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010938X12000625>
- [47] *Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies: Mechanisms, Modelling and Future Development* [online]. USA: Woodhead Publishing, 2012 [cit. 2020-05-14]. ISBN 978-0-85709-536-7. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780857095367/gaseous-hydrogen-embrittlement-of-materials-in-energy-technologies#book-info>
- [48] *Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells* [online]. Paris: International Energy Agency, 2015, -(-) [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: [http://ieahydrogen.org/pdfs/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells-\(1\).aspx](http://ieahydrogen.org/pdfs/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells-(1).aspx)
- [49] WISEMAN, Ed. UK hydrogen fuel network grows with new pump on M40. *The Telegraph* [online]. Telegraph Media Group, 2018, 26 March 2018, -(-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.telegraph.co.uk/cars/news/uk-hydrogen-fuel-network-grows-new-pump-m40/>

- [50] ALLAN, Matt. Hydrogen cars: How the fuel cell works, where the UK's filling stations are and how expensive they are to run. *Sussex press* [online]. 2020, 5 February 2020, (-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.sussexpress.co.uk/lifestyle/cars/hydrogen-cars-how-fuel-cell-works-where-uks-filling-stations-are-and-how-expensive-they-are-run-1386285>
- [51] BROWN JR., Edmund G. Joint Agency Staff Report on Assembly Bill 8:: Assessment of Time and Cost Needed to Attain 100 Hydrogen Refueling Stations in California. - [online]. 2015, December 2015, (-), 11-55 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://ww2.energy.ca.gov/2015publications/CEC-600-2015-016/CEC-600-2015-016.pdf>
- [52] POLLET, Bruno G., Iain STAFFELL a Jin Lei SHANG. Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects. *Electrochimica Acta* [online]. 2012, **84**(-), 235-249 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1016/j.electacta.2012.03.172. ISSN 00134686. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013468612005671>
- [53] 2020 Toyota Mirai [online]. -: Hearst Digital Media, 2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/toyota/mirai>
- [54] 2020 Hyundai Nexo [online]. -: Hearst Digital Media, 2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/hyundai/nexo>
- [55] Renault Zoe [online]. Česká republika: CZECH NEWS CENTER a.s, 2013 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/renault-zoe-elektromobil-za-pouhych-350-000-korun-74040>
- [56] DODDS, Paul E. a Paul EKINS. A portfolio of powertrains for the UK: An energy systems analysis. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2014, **39**(26), 13941-13953 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.06.128. ISSN 03603199. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319914018680>
- [57] BRANDON, N. P. a Z. KURBAN. Clean energy and the hydrogen economy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 2017, **375**(2098), - [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1098/rsta.2016.0400. ISSN 1364-503X. Dostupné z: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2016.0400>
- [58] BU-210: How does the Fuel Cell Work? [online]. -: Isidor Buchmann., 2011 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/fuel_cell_technology
- [59] Low carbon cars in the 2020: Consumer impacts and EU policy implications. - [online]. 2016, November 2016, (-), 32-54 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.beuc.eu/publications/beuc-x-2016-121_low_carbon_cars_in_the_2020s-report.pdf
- [60] International Energy Outlook 2019: with projections to 2050. - [online]. 2019, September 24, 2019, (-), 67-84 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf>
- [61] Fuel Cell System Cost-2015. *DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record* [online]. 2015, October 22, 2015, **Record #:** 15015(-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/15015_fuel_cell_system_cost_2015.pdf
- [62] How hydrogen empowers the energy transition. *Hydrogen Council* [online]. 2017, January 2017, (-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/06/Hydrogen-Council-Vision-Document.pdf>

- [63] Hydrogen and Fuel Cells: Opportunities for Growth. - [online]. 2016, August 2016, -(-), 14-50 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.scottishcities.org.uk/site/assets/files/1108/hfcroadmap-mainreport.pdf>
- [64] STEPHENS, Ifan Erfyl Lester, Jan ROSSMEISL a Ib CHORKENDORFF. Toward sustainable fuel cells. *Science* [online]. 2016, **354**(6318), 1378-1379 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1126/science.aal3303. ISSN 0036-8075. Dostupné z: <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.aal3303>
- [65] KROK, Andrew. The precious: Bosch's EV fuel cells will use way less platinum than usual, report says: Reuters claims it'll need about 10% of the platinum that other fuel cells require. *Roadshow* [online]. 2019, May 13, 2019, -(-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.cnet.com/roadshow/news/bosch-ev-fuel-cells-less-platinum-report/>
- [66] ONSTAD, Eric. Exclusive: Bosch goes for platinum-light fuel cells. - [online]. 2019, May 13, 2019, -(-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.reuters.com/article/us-platinum-week-bosch-fuelcells-exclusi/exclusive-bosch-goes-for-platinum-light-fuel-cells-idUSKCN1SJ0FG>
- [67] *Sales Statistics* [online]. -: OICA, 2019 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://www.oica.net/category/sales-statistics/>
- [68] Toyota moves to expand mass-production of fuel cell stacks and hydrogen tanks towards ten-fold increase post-2020. - [online]. Toyota, 2018, May 24, 2018, -(-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/22647198.html>
- [69] KABLE, Greg. Audi Renews Hydrogen Fuel Cell Development. - [online]. 2019, May 03, 2019, -(-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.wardsauto.com/industry/audi-renews-hydrogen-fuel-cell-development>
- [70] SVATOŠ, Patrik. Kolik máme v ČR nabíjecích stanic a kolik jich do roku 2022 přibude? *FDrivecz* [online]. 2019, 28. 11. 2019, -(-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/kolik-mame-v-cr-nabijecich-panic-a-kolik-jich-do-roku-2022-pribude-4582>
- [71] ALAZEMI, Jasem a John ANDREWS. Automotive hydrogen fuelling stations: An international review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, **48**(-), 483-499 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1016/j.rser.2015.03.085. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115002385>
- [72] H₂ stations: 83 new hydrogen refuelling stations worldwide. - [online]. 2020, 24. Februar 2020, -(-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.internationales-verkehrswesen.de/h%E2%82%82-stations-83-new-hydrogen-refuelling-stations-worldwide/>
- [73] BERGER, Roland. Fuel Cell Electric Buses: Potential for Sustainable Public Transport in Europe. - [online]. 2015, September 2015, -(-), 11-42 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/150909_FINAL_Bus_Study_Report_OUT_0.PDF
- [74] *Final report of the bus study: Urban buses: alternative power trains for Europe* [online]. -: -, 2012 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.fch.europa.eu/node/790>
- [75] *Tesla Semi* [online]. USA: -, 2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.tesla.com/semi>

- [76] Kenworth Receives \$8.6 Million in Grants for T680 Drayage Truck Projects in California. *Transport Topics* [online]. 2016, August 15, 2016, (-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.ttnews.com/articles/kenworth-receives-86-million-grants-t680-drayage-truck-projects-california>
- [77] Toyota Rolls Out Hydrogen Semi Ahead Of Tesla's Electric Truck. *Forbes* [online]. 2017, Apr 19, 2017, (-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/alanohnsman/2017/04/19/toyota-rolls-out-hydrogen-semi-ahead-of-teslas-electric-truck/#42d8a762582b>
- [78] *Nikola Motor Company* [online]. USA: -, 2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://nikolamotor.com/motor>
- [79] VELAZQUEZ ABAD, Anthony, Tom CHERRETT a Ben WATERSON. Sim-heuristics low-carbon technologies' selection framework for reducing costs and carbon emissions of heavy goods vehicles. *International Journal of Logistics Research and Applications* [online]. 2016, 20(1), 3-19 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1080/13675567.2016.1203395. ISSN 1367-5567. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13675567.2016.1203395>
- [80] Cleaner urban transport with hydrogen buses. *Hydrogen Europe* [online]. 2018, (-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://hydrogeneurope.eu/cleaner-urban-transport-hydrogen-buses>
- [81] *Toyota to Start Sales of Fuel Cell Buses under the Toyota Brand from Early 2017 (in Japan)* [online]. -: -, 2016 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://pressroom.toyota.com/toyota-fuel-cell-buses-japan/>
- [82] OBIKO, Natalie. China's Buses Bolster Ballard's Three-Decade Quest for Hydrogen. *Bloomberg Quint* [online]. 2017, (-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.bloombergquint.com/technology/china-s-buses-bolster-ballard-s-three-decade-quest-for-hydrogen>
- [83] London hydrogen buses and the CHIC project. - [online]. 2016, May 2016, (-), 12 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.all-energy.co.uk/RXUK/RXUK_All-Energy/2016/Presentations%202016/Hydrogen%20and%20Fuel%20Cells/Ben%20Madden.pdf?v=635993507410544891
- [84] *Bus fleet data & audits* [online]. Londýn: -, 2019 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://tfl.gov.uk/corporate/publications-and-reports/bus-fleet-data-and-audits>
- [85] Germany's RMV places €500m order for 27 fuel cell trains. *Railway Technology* [online]. 2019, 22 May 2019, (-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.railway-technology.com/news/germanys-rmv-coradia-ilint-trains/>
- [86] https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/ceska-vodikova-technologicka-platforma-hytep_43303.html. - [online]. 2018, 23. únor 2018, (-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/ceska-vodikova-technologicka-platforma-hytep_43303.html
- [87] Use of Hydrogen Powered Vehicles in Transport in the Czech Republic. - [online]. 2017, (-), 18-56 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/Study-Use-of-Hydrogen-Powered-Vehicles-in-Transport-in-the-Czech-Republic.pdf>

- [88] *Národní akční plán čistémobility* [online]. Česká Republika, 2020, 2(-) [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/54377/64225/657999/priloha001.pdf>
- [89] Strategická výzkumná agendarozvoje vodíkového hospodářství v ČR. - [online]. 2010, Únor 2010, (-), 1-9 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/SVA_HYTEP.pdf
- [90] První veřejné vodíkové čerpací stanice vzniknou letos, stát podpoří budování dalších. V Operačním programu Doprava je pro ně připraveno 102 milionů Kč. *Logistika* [online]. 2020, 5. 2. 2020, (-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://logistika.ihned.cz/c1-66716750-prvni-verejne-vodikove-cepaci-stanice-vzniknou-letos-stat-podpori-budovani-dalsich-v-operacnim-programu-doprava-je-pro-ne-pripraveno-102-milionu-kc>
- [91] Czechs begin to restrain hydrogen. - [online]. 2019, 03.07.2019, (-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.czechtradeoffices.com/en/kr/news/czechs-begin-to-restrain-hydrogen>
- [92] Předpoklady pro rozvoj vodíkové mobility v České republice. - [online]. 2019, 31.10.2019, (-), 2-21 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://petrol.cz/media/189773/ing.-jiri-hajek-mba-unicre.pdf>
- [93] Překážky rozvoje vodíkové mobility v ČR. - [online]. Brno, 2018, 21. 11. 2018, (-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/cista_mobilita_seminar/\\$FILE/OPZPUR-Doucek-201812112.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/cista_mobilita_seminar/$FILE/OPZPUR-Doucek-201812112.pdf)
- [94] *Národní akční plán čistémobility* [online]. 2019, 2(-) [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/54377/64225/657999/priloha001.pdf>
- [95] *Rozvoj vodíkové mobility v Ostravě* [online]. Ostrava: -, 2019 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://www.mhd-ostrava.cz/?s=vodik>
- [96] Moravskoslezský kraj vsází na vodíkovou dopravu. Měla by přinést čistší vzduch. - [online]. 2019, 30. 3. 2019, (-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/veda/2773742-moravskoslezsky-kraj-vsazi-na-vodikovou-dopravu-mela-prinest-cisti-vzduch>
- [97] Autobusy v Ústí budou jezdit na vodík. *Právo* [online]. 2020, 18. 2. 2020, (-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/domaci/clanek/autobusy-v-usti-budou-jezdit-na-vodik-40313516>
- [98] V Česku mají posílit hromadnou dopravu vodíkové autobusy i vlaky. *Hybrid.cz* [online]. 2019, 18 Duben 2019, (-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/v-cesku-maji-posilit-hromadnou-dopravu-vodikove-autobusy-i-vlaky>
- [99] *Operační program Doprava* [online]. Česká Republika: Ministerstvo Dopravy, 2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.opd.cz/stranka/Ministerstvo-dopravy-pripravilo-dalsi-vyzvu-OPD-na-podporu-vystavby-plnicich-stanic-na-vodik>
- [100] Doba vodíková. První auta i čerpací stanice budou v Česku příští rok Zdroj: https://www.idnes.cz/ekonomika/domaci/auto-na-vodik-ekologie-eletromobilita.A190703_487101_ekonomika_rts.IDnes.cz [online]. 2019, 4. července 2019, (-), - [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/ekonomika/domaci/auto-na-vodik-ekologie-eletromobilita.A190703_487101_ekonomika_rts

- [101] TriHyBus. In: *ÚJV Řež, a. s.* [online]. Brno: -, 2010, 2010 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.ujv.cz/file/edee/2017/06/trihybus_cz.pdf
- [102] JUODKAZIS, Kestutis, Jurga JUODKAZYTE, Edgaras JELMAKAS, Putinas KALINAUSKAS, Ignas VALSIUNAS, Povilas MECINSKAS a Saulius JUODKAZIS. Photoelectrolysis of water: Solar hydrogen - achievements and perspectives. *Optics Express* [online]. 2010, **18**(S2), - [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1364/OE.18.00A147. ISSN 1094-4087. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-18-S2-A147>
- [103] ČOČEK, BEDŘICH. *VÝROBA A USKLADNĚNÍ VODÍKU* [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30293794.pdf>. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce ING. JIŘÍ HEJČÍK, PH.D.
- [104] GUPTA, Ram B., ed. *Hydrogen Fuel: Production, Transport, and Storage*. 1. Velká Británie: CRC Press, 2008. ISBN 978-1420045758;142004575X.